

Plans de leçons et montages

L'agrégation fantastique

Épisode(s) de la vie d'un agrégatif

Erwan Allys, Olivier Fauvarque

2013-2014

Table des matières

1	Préambule	4
1.1	Présentation	4
1.2	Notes sur les références	6
1.3	Remerciements	7
2	Leçons de Physique V. Allys	8
2.1	Contact entre deux solides. Frottement.	9
2.2	Caractère non galiléen du référentiel terrestre	11
2.3	Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopiques et microscopiques	13
2.4	Lois de conservation en dynamique des système	15
2.5	Cinématique relativiste	17
2.6	Dynamique relativiste	19
2.7	Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux	21
2.8	Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide	23
2.9	Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	24
2.10	Gaz parfait, gaz réels	25
2.11	Premier principe de la thermodynamique	27
2.12	Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé	28
2.13	Application des deux premiers principes aux machines thermiques	30
2.14	Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases	31
2.15	Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique	33
2.16	Rayonnement d'équilibre. Corps noir	35
2.17	Phénomènes de Transport	37
2.18	Flux conductifs, convectifs, radiatifs, bilans thermiques	38
2.19	Conversion de puissance électromécanique	39
2.20	Induction électromagnétique	41
2.21	Résonance magnétique nucléaire	43
2.22	Rétroaction et oscillation	45
2.23	Traitement analogique d'un signal électrique, étude spectrale	47
2.24	Ondes progressives, Ondes stationnaires	49
2.25	Ondes acoustiques	51
2.26	Propagation dans un milieu dispersif	53
2.27	Propagation guidée des ondes	55
2.28	Ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique	57
2.29	Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs	59
2.30	Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique	60
2.31	Présentation de l'optique géométrique à partir du principe de Fermat	61
2.32	Interférences à deux ondes en optique	63
2.33	Interféromètres à division d'amplitude	65
2.34	Diffraction de Fraunhofer	67
2.35	Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique	69
2.36	Absorption et émission de la lumière	70
2.37	Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon	72
2.38	Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d'onde	74
2.39	Confinement de l'électron et quantification de l'énergie	76
2.40	Effet Tunnel	78
2.41	Fission, Fusion	79
2.42	Oscillateur à deux degrés de liberté en mécanique classique et en mécanique quantique	80
2.43	La molécule : stabilité, énergie	82
2.44	Capacités thermiques : description, interprétation microscopique	84
2.45	Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation du champ moyen	86
2.46	Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques	88
2.47	Mécanismes de la conduction électrique dans les solides	89

2.48	Phénomènes de résonances dans différents domaines de la physique	90
2.49	Oscillateurs, portraits de phase et non-linéarités	92
3	Leçons de Physique V. Fauvarque	93
3.1	Contact entre deux solides. Frottement	94
3.2	Caractère non galiléen du référentiel terrestre	96
3.3	Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique	98
3.4	Cinématique relativiste	100
3.5	Notion de viscosité d'un fluide	102
3.6	Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide	104
3.7	Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	105
3.8	Application des deux premiers principes aux machines thermiques	106
3.9	Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique	108
3.10	Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir	110
3.11	Phénomènes de transport	112
3.12	Induction électromagnétique	114
3.13	Résonance magnétique nucléaire	116
3.14	Ondes progressives, ondes stationnaires	118
3.15	Ondes acoustiques	120
3.16	Propagation dans un milieu dispersif	122
3.17	Propagation guidée des ondes	123
3.18	Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques	125
3.19	Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs	127
3.20	Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat	129
3.21	Interférences à deux ondes en optique	131
3.22	Interféromètres à division d'amplitude	133
3.23	Diffraction de Fraunhofer	135
3.24	Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique	136
3.25	Absorption et émission de la lumière	137
3.26	Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon	139
3.27	Confinement de l'électron et quantification de l'énergie	141
3.28	Effet tunnel	143
3.29	Fusion, fission	144
3.30	Paramagnétisme, ferromagnétisme. Approximation du champ moyen	146
3.31	Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques	148
3.32	Mécanisme de la conduction électrique dans les solides	150
3.33	Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique	152
3.34	Oscillateurs. Portraits de phase et non-linéarités	154
4	Montages de Physique	155
4.1	Dynamique Newtonienne	156
4.2	Surfaces et Interfaces	157
4.3	Dynamique des fluides	158
4.4	Capteurs de grandeurs mécaniques	159
4.5	Mesures de températures	161
4.6	Transitions de phase	162
4.7	Instruments d'optique	163
4.8	Interférences lumineuses	164
4.9	Diffraction des ondes lumineuses	165
4.10	Spectrométrie optique	166
4.11	Émission et absorption de la lumière	167
4.12	Photorécepteurs	168
4.13	Biréfringence et Pouvoir Rotatoire	169
4.14	Polarisation des ondes EM	170
4.15	Production et mesure de champs magnétiques	171
4.16	Milieux magnétiques	172

4.17 Métaux	173
4.18 Matériaux semi-conducteurs	174
4.19 Effets capacitifs	175
4.20 Induction, auto-induction	176
4.21 Production et Conversion d'énergie électrique	177
4.22 Amplification de signaux	178
4.23 Mise en forme, transport et détection de l'information	179
4.24 Acquisition, analyse et traitement des signaux	180
4.25 Mesures de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)	182
4.26 Mesures de longueurs	183
4.27 Systèmes bouclés	184
4.28 Instabilités et phénomènes non-linéaires	185
4.29 Ondes, propagation et conditions aux limites	186
4.30 Acoustique	187
4.31 Résonances	188
4.32 Couplage des oscillateurs	189
4.33 Régimes transitoires	190
4.34 Phénomènes de transport	191
4.35 Moteurs	192
5 Leçons de Chimie	193
5.1 Chimie et couleur	194
5.2 Stéréochimie	195
5.3 Solubilité	196
5.4 Conversion d'énergie chimique	197
5.5 Séparation, purification, contrôle de pureté	198
5.6 Matériaux polymères	199
5.7 Chimie et développement durable	200
5.8 Synthèses inorganiques	201
5.9 Stratégie en synthèses organiques	203
5.10 Dosage par étalonnage	204
5.11 Dosage par titrage	205
5.12 Optimisation des cinétiques de réaction	206
5.13 Synthèse organique : caractérisation par spectroscopie	207
5.14 Relation structure réactivité en chimie organique	209
5.15 Réaction chimique par échange de proton	210
5.16 Capteurs électrochimiques	211
5.17 Molécules de la santé	212
5.18 Structures et propriétés des molécules du vivant	213
5.19 Solvants	215
5.20 Classification périodique	216
5.21 Solides cristallins	218
5.22 Réactions d'oxydoréduction	219
5.23 Réactions de précipitation	220
5.24 Dosage suivi par potentiométrie	221
5.25 Dosages acido-basiques	222
5.26 Cinétique homogène	223
5.27 Évolution et équilibre chimique	224
5.28 Optimisation d'un processus de synthèse industrielle	225
5.29 Hydrométallurgie	227
5.30 Diagrammes E-pH	228
5.31 Corrosion humide des métaux	229
5.32 Configuration et conformation	230

Préambule

Présentation

Quand on prépare l'agrégation de physique, il est toujours utile d'avoir des plans pour s'aider à travailler les oraux. C'est dans ce but que ce document a été rédigé. Élèves à l'ENS de Paris, nous avons tout deux préparé l'agrégation de physique lors de l'année 2013-2014 (nous y avons d'ailleurs été reçus premier et deuxième), à l'ENS Paris dans les locaux de Montrouge. C'est lors de cette année que nous avons rédigé progressivement tous nos plans qui sont ici remis au propre. Nous les avons discutés systématiquement au moins à deux et bien souvent avec d'autres camarades de la préparation.

Que les choses soient claires : bien que pouvant être d'une grande aide, ce document n'a pas pour but de vous donner des plans tout faits que vous pourrez utiliser directement. En effet, lors de la préparation d'une leçon, l'impératif premier pour le candidat sera de se l'approprier. Les plans ici fournis ne devront donc lui apparaître que comme de la matière brute. Il devra ensuite s'efforcer d'établir sa propre articulation de leçon quitte à bouleverser complètement nos plans (nous n'avons aucune prétention quant à présenter *les* plans qui assureront une bonne note le jour de l'oral, ils ne correspondent qu'à notre sensibilité physique, ils ne sont qu'une proposition). Nous mettons donc particulièrement en garde ceux qui voudraient juste recopier des plans pour finir vite la préparation aux oraux, cette démarche très cavalière risquant de coûter cher le jour J.

Une bonne année de préparation à l'agrégation se décompose selon nous en deux parties. Commencer dès le début de l'année à rédiger ses plans de leçons et montages semble une mauvaise chose. Il faut en effet commencer par s'assurer une bonne maîtrise des connaissances de base. Celle-ci établie, une certaine forme de recul émergera et permettra d'obtenir une vision d'ensemble quant aux leçons. Il sera alors plus aisé d'identifier ce qui est attendu dans chacune de celles-ci.

Ainsi, nous conseillons d'utiliser la première partie de l'année pour reprendre son cours et le maîtriser une bonne fois pour toute. Dans ce but, une reprise honnête et assez approfondie de tous les domaines non maîtrisés semble incontournable. Pour l'application de ces cours et la reprise des domaines déjà maîtrisés, l'idéal est de commencer très tôt à faire des sujets d'écrits, en se restreignant surtout aux compositions (il est facile d'apprendre assez vite à trouver les corrigés sur BupDoc). Avoir fait au moins une dizaine de compositions en entier, voire même une vingtaine (et sans laisser de côté les sujets incontournables) semble un minimum. En travaillant ces compositions, qui sont pour la plupart très bien faites, on ciblera aussi mieux les attentes en terme de niveau à l'agrégation, et on complètera en profondeur sa compréhension des sujets abordés. Il est bien entendu évident que ce travail sera très utile pour les épreuves écrites.

En parallèle, participer activement aux préparations de leçons est important, pour apprendre ce qu'est vraiment une leçon d'agrégation. C'est en effet progressivement, et dans la deuxième partie de la préparation des écrits, qu'il faudra commencer à préparer ses plans de leçons, en débutant par les domaines où une bonne compréhension était présente initialement. L'apprentissage se fera de toute façon par la pratique. Dans ce cadre, le travail d'équipe est très important. Il est en effet très fréquent (particulièrement en début d'année) de se lancer tête baissée dans une voie un peu trop exotique alors que ce "lyrisme" aurait été très vite repéré dans une discussion avec d'autres agrégatifs.¹ Discutez-donc en groupe de vos idées, cela ne fera que les améliorer !

Remarques quant à la leçon de physique

Pour commencer, il est nécessaire de se persuader que le ciblage du niveau et des pré-requis est fondamental. Il ne faut pas partir sur un exercice qu'on veut faire en particulier, mais vraiment se demander : "D'où part-on ? Jusqu'où ira-t-on ? Quelles idées principales veut-on faire passer ?". La construction du plan en découlera naturellement. Il sera également utile de savoir identifier rapidement les éléments dispensables à la leçon.

Les plans de leçon présentés dans ce document sont en double. En effet, même si toutes les leçons ont été discutées entre nous, nous avons tous les deux des sensibilités physiques différentes, ce qui mène à des plans différents. On notera d'ailleurs que pour deux plans similaires, les descriptions de ceux-ci peuvent quand même être très différentes, ce qui est surtout dû à notre façon propre de les décrire. Il peut toujours

1. Pour donner un exemple quant à ce fameux travail de groupe, nous avons pendant l'année effectué une série d'oraux blancs, que nous corrigions entre nous. Avec le recul, nous pouvons affirmer que ces leçons furent celles que nous ressentions comme les mieux préparées. D'autre part, le fait de se mettre à la place du jury permet aussi de visualiser les choses de façon très différente, et apporte donc un point de vue très intéressant sur les attentes à avoir d'un oral.

être utile de regarder en parallèle les deux plans. Certaines leçons étaient vraiment redondantes, et nous avons choisi lorsque ce cas se présentait de ne donner qu'une seule version de celles-ci, pour ne pas alourdir inutilement ce document. Il est important de noter que ces leçons sont bien évidemment l'œuvre d'un travail commun (comme c'est d'ailleurs le cas pour l'intégralité des plans), même si elles ne sont présentées que dans les plans de E. Allys. Certaines rares leçons sont très succinctes, car elles ont été rédigées à l'époque comme notes personnelles. Nous nous en excusons, mais nous n'avions pas forcément le courage ou le temps de mettre tout au propre après le concours.

Le lecteur s'apercevra rapidement que selon les domaines concernés (et donc selon notre maîtrise du sujet), la complexité des plans peut beaucoup varier. Cependant, il est important de noter que nous avons souvent fait des plans audacieux et assez longs, nécessitant une compréhension poussée du sujet étudié. Une présentation d'un plan similaire sans maîtrise du domaine sous-jacent est tout sauf une bonne idée, et c'est pour cela qu'il est nécessaire de savoir prendre du recul sur ce qui va être présenté effectivement. Il faut en effet garder à l'esprit qu'il est impératif de toujours maîtriser au delà de ce qui est présenté, c'est indispensable pour la clarté de votre exposé. Vous pouvez toujours essayer d'impressionner le jury en parlant de choses que vous comprenez mal, mais sachez bien que ça n'a jamais été très fructueux...

En bref, il ne faut donc pas construire une leçon d'agrégation, mais bien *vo*tre leçon d'agrégation. Et pour cela, il y a une part de travail que personne ne peut faire à votre place. Regardez donc les documents à votre disposition, mais soyez critiques, remettez systématiquement en question ce qu'on peut vous dire², et laissez s'exprimer *vo*tre vision des choses !

Remarques quant aux montages

La quasi-intégralité des expériences décrites a été effectuée à au moins deux reprises, et nous sommes à peu près sûrs qu'elles fonctionnent bien. Notons cependant que celles-ci ont été faites avec le matériel de Montrouge. Par ce fait même, tous les conseils techniques ne s'appliquent évidemment qu'au matériel que nous avons utilisé. Mais de toute façon, après une année de manipulation avec un matériel donné, toutes les expériences seront naturellement adaptées, et il n'y a pas de soucis particulier à se faire.

Notons quand même que la physique expérimentale demande un grand investissement et cela dès le début de l'année. Une bonne maîtrise du matériel demande donc forcément d'avoir passé beaucoup de temps à le manipuler, et un minimum d'assiduité durant les TP pendant l'année est absolument indispensable. Idéalement, il faudrait à la fin d'année connaître suffisamment le matériel pour pouvoir développer seul ses propres protocoles expérimentaux ; cela permet, en plus de maîtriser ses manipulations en profondeur, de pouvoir mettre en avant exactement le point souhaité. Bref, dès que vous vous sentez un peu à l'aise, sortez le nez du *Quaranta*, et faites vos propres manipulations !

Certaines expériences sont indiquées avec une astérisque. Cela indique qu'elles sont facultatives ou bien alternatives. Les lecteurs ne devront subséquemment pas s'inquiéter du caractère un peu trop vaste de certains montages... De toute façon et comme discuté en détail précédemment, c'est à eux de construire selon leur sensibilité, un plan cohérent et respectant la temps imparti.

Remarques quant à la chimie

Il est bien évident que comme un tiers des épreuves de l'agrégation reposent sur ce domaine, il est absolument inenvisageable de faire l'impasse sur cette discipline. Beaucoup se rendront compte d'ailleurs que la chimie a beaucoup à apporter à une vision complète et profonde de la physique.

Quoi qu'il en soit, la chimie nécessitant des approches souvent très différentes de la physique, un travail sérieux et régulier d'apprentissage du cours est indispensable tout au long de l'année, avec comme objectif d'avoir fini l'ensemble du programme de l'agrégation quelques semaines avant les écrits. Là encore, avoir fait une bonne dizaine – au moins – d'anciennes compositions permettra de fixer ses connaissances une bonne fois pour toute. Ceux qui auront suivi un parcours avec très peu de chimie (par exemple une MP suivi d'un parcours de physique fondamental) doivent vraiment prendre au sérieux l'immensité du programme de chimie qui les attend. Une mention spéciale est à donner à la chimie organique, qui est le domaine de loin le plus distant des méthodes physiques, et dont la plus grande partie n'est nécessaire que pour les écrits. L'apprendre par cœur les quelques semaines précédant la composition peut permettre de se libérer la tête le reste du temps, mais cela demande une bonne organisation.

2. Même le contenu de ce document, et oui !

Nous sommes convaincus que plus que dans tout autre matière des discussions en groupe des leçons sont d'une importance capitale, pour essayer notamment de décoder les indications parfois cryptiques accessibles dans les différents rapports. Comme la leçon de physique, il sera capital de bien cibler ce qui est important pour la leçon et de le discuter en détail, en évitant toute dérive annexe qui n'apporte rien à la discussion. Bien avoir un fil directeur auquel on rattache de l'intérêt, qui nous permet d'avancer tout au long de la leçon, et qui peut si possible émerger d'une expérience introductive permet souvent de changer une leçon floue et terne en une leçon claire et intéressante, et cela est presque un impératif (cela peut sembler une évidence, énoncé comme cela, mais c'est malheureusement trop souvent oublié, c'est pourquoi nous le rappelons).

Pour ce qui est des manipulations lors des épreuves, il faudra s'efforcer dès le début de l'année de mettre les manipulations au service de la leçon, et pas le contraire, ce qui est bien souvent catastrophique car l'essence même de la leçon y est souvent sacrifiée. On préférera si possible les expériences simples mais très probantes, un changement de couleur étant souvent la meilleure méthode pour mettre un phénomène chimique en avant, quand c'est possible. Sachant qu'il faut compter en pratique seulement 3h de préparation pour le leçon de chimie le jour de l'agrégation (entre les temps de battement, la préparation de *agir*, et l'utilisation d'une salle de labo que l'on ne connaît pas), il faudra aussi bien connaître et avoir réalisé pendant l'année l'ensemble de ses manipulations pour l'oral, et éviter à tout prix les manipulations longues et qui ne servent pas vraiment les leçons³. Cela peut donc sembler très difficile, mais si possible, il faudrait commencer à réfléchir dès le début de l'année aux expériences que l'on compte mettre dans les leçons, et les tester lors des TP de la période de préparation des écrits.

Les plans qui sont donnés ici résultent de plusieurs mois de discussions (notamment avec des camarades qui avaient une formation beaucoup plus chimiste que la notre), et ont été construits en suivant très consciencieusement le programme des classes de lycées quand c'était nécessaire. Ils sont bien entendu moins fiables et moins étoffés que nos plans de physique, mais nous en sommes assez satisfaits. Il est quand même à noter que comme nous n'avions pas de retour du jury sur une grande partie des leçons, elles seront sûrement à adapter quand ceux-ci seront disponibles. Les leçons de séries générales sont à peu près bien ciblées, mais il sera très important de regarder précisément le retour du jury sur les leçons 6 à 8, 14, et 16 à 18 (et/ou prier pour ne pas tomber dessus...).

Conclusion

Nous espérons évidemment que ces plans seront utiles au plus grand nombre, mais gardez bien à l'esprit que de toute façon, rien ne vaut le fait de réfléchir soi-même à son organisation dans l'année d'agrégation, et à ses plans d'épreuves orales : il faudra y mettre votre propre personnalité ! Nous mettons à libre disposition ce document sur internet en vous priant d'excuser les inévitables erreurs qui ont pu s'y glisser, nous ne sommes pas infaillibles.

Notes sur les références

Nous sommes bien conscients que l'utilisation de livres est au centre de l'oral d'agrégation, et c'est pour cela que nous nous sommes efforcés de donner dans ce document *un minimum* de références. Nous tenons d'ailleurs à remercier les différents auteurs.

Il faudra vite apprendre à utiliser plusieurs livres en parallèle en préparant une leçon, et pas seulement un livre de référence. En physique, nous donnons souvent un ou deux ouvrages centraux, mais il pourra être utile de regarder, de façon plus ou moins systématique, les *Tout-en-Un* récents de *Dunod* et des plus vieux, notamment les vieux *Tec&Doc* de *Hachette*, ainsi que toute la collection des *Pérez* et des *BFR* (Bertin, Faroux, Renault). Il est aussi toujours intéressant de jeter un coup d'œil aux *Landau* (pour la rigueur) et aux *Feynman* (pour les exemples sympas), voir même aux *Berkeley*, pour ceux qui préfèrent (le traité général sur les ondes est très intéressant). De toute façon, c'est à chacun de repérer les livres qu'il aime utiliser.

Pour la chimie, nous avons souvent mis un peu rapidement les livres utilisés, mais ce sont toujours les quelques livres classiques d'une bibliothèque expérimentale de préparation à l'agrégation, appelés par leurs

3. De manière générale, faire une synthèse organique alors que ce n'est pas absolument nécessaire pour la leçon coutera souvent une bonne poignée de points dans le résultat final...

petits surnoms. Sauf exception, qui est alors précisée, les *Tout-en-Un* de *Dunod* suffisent bien largement pour toute la partie théoriques des leçons.

En ce qui concerne les montages, même si les références ne sont pas forcément indiquées, il y a de quoi à peu près tout faire dans les *Quaranta*, dans les *Duffait*, *Krob*, et autres pour l'électronique, et dans le *Sextant* pour l'optique. Prendre un bon livre de prépa sur le sujet est aussi toujours très utile. Mais de toute façon, il faudra apprendre à se passer progressivement des livres au fur et à mesure de l'année.

Remerciements

Avant toute chose, ce document n'aurait pu exister sans tous ceux qui ont travaillé avec nous et supporté toutes nos frasques. Une année d'agrégation se travaille en groupe et nous leur devons beaucoup.

En particulier, nos pensées vont pour le "premier cercle" : Anne, DamDam, La Jem', La Touille. Nous avons beaucoup appris à vos cotés et ce document est aussi le vôtre. Nos pensées vont aussi pour le binôme de choc d'opticiens, Hallan et Harold, et leurs chemises toujours appareillées. Mais nous n'oublions pas bien évidemment tous les autres, et particulièrement ceux qui ont participé aux leçons supplémentaires, et aux discussions des plans de chimie ; merci à vous.

Comme de bons étudiants ne pourraient pas exister sans un bon encadrement, nous gardons à l'esprit nos professeurs de classes préparatoires, toujours très clairs et enthousiastes, ainsi que notre formation à l'École Normale Supérieure de la rue d'Ulm. Spécifiquement cette année, nous pensons notamment à Yves Guldner pour ses cours d'une clarté et précision impressionnantes, ainsi qu'à JMR et Agnès, avec qui les discussions furent toujours très intéressantes. Pour l'encadrement des TP, nous remercions Kenneth, Benj', Beubeu, Christoffel, Ludivine, Vieuxkip's, Anthony, Arnaud, Manu, Guillaume et Beubard-Boby, qui ont aussi participé au développement de beaucoup d'expériences et montages.

On imagine bien qu'une préparation à l'agrégation ne pourrait exister sans personnel technique, et notre plus profonde reconnaissance va à Éric et Soumaly, infatigables et d'une compétence à peine croyable : sans vous, rien n'aurait été possible, et la prépa agrég a bien de la chance de vous avoir.

Concernant la chimie, nous remercions les enseignants qui se sont donnés la peine d'essayer de clarifier ce domaine pour des étudiants pas toujours très perméables à cette science, et tout particulièrement Sylvain et Anne-Sophie, qui ont fait un travail remarquable.

Les auteurs remercient également tout ceux qui par leur remarques pendant l'année scolaire 2014-2015 ont permis de perfectionner ce document.⁴

En vrac, nous tenons à remercier le café dans les salles, les toilettes d'un Flunch, le numéro 59, le fait de prendre des filtres à la mauvaise longueur d'onde, des enceintes et un fauteuil que l'année aura éprouvés, le tarama, l'Opéra Bastille, la tour B de Montrouge qui a parfois eu les oreilles qui saignaient un peu, les olives aux anchois, un wagon de première classe qui aura un peu subi, la pêche, le piano, le RCL, des élèves collés parfois peu perméables à l'humour, les canards, le fait de parler fort au fond des salles de cours, un plâtre, des béquilles, la grande salubrité des internats de l'ENS, la liberté de penser, la cavitation, les clapotis à 12Hz, l'humour de merde, la Belgique, de fameux Kebabs, une cloche et des tautologies, la condescendance, et une île de Crête, où vécut autrefois une grande poétesse.

Merci enfin à toi, Hector Berlioz, génie incontesté et musicien hors pair, sans qui notre année aurait été bien terne!

Erwan Allys⁵
Olivier Fauvarque⁶
août 2014

dernière mise à jour :
20 janvier 2016

4. Nommons ainsi : l'équipe enseignante et quelques étudiants très investis de la prépa agrég de Marseille qui suggérèrent de nombreuses nouvelles manip. ; ainsi que quelques étudiants de la prépa agrég de Montrouge, et particulièrement Matthieu Pierce (reçu premier en 2015) pour ses remarques sur nos plans ainsi que pour la rédaction du montage Moteurs.

5. erwan@allys-fr.org

6. olivier.fauvarque09@normalesup.org

Leçons de Physique

Version E. Allys

"L'homme avisé suit sa propre direction."
Euripide

LP1 : Contact entre deux solides. Frottement

Bibliographie : Pérez, Tout-en-un MP/MP*, Gié et BFR de méca, etc ...

Niveau : MP

Pré-requis : Mécanique du point, cinématique et dynamique des solides

Remarque : Il est intéressant dans le cadre de cette leçon de bien faire la distinction entre une force donnée et une force non donnée. Avec la première, on connaît entièrement la force à partir du moment où on a la donnée du problème, par exemple la force de Lorentz, la gravitation, ou des frottements fluides. Ces forces peuvent être des formules fondamentales (comme la force de Lorentz), ou des formules phénoménologiques (comme les frottements visqueux). En opposition, on ne connaît a priori pas une force non donnée, comme la réaction du support, la tension d'un fil, etc ... Et il faudra résoudre les équations de la dynamique sur des directions où elles n'apparaissent pas, pour les avoir ensuite par ces mêmes équations une fois le mouvement connu. Dans ce contexte, on comprend bien le caractère très original et spécifique des lois de Coulomb, qui donne des informations sur une force non donnée, mais sans la préciser entièrement.

Introduction : faire sentir l'omniprésence des actions de contacts dans la vie de tous les jours (notamment la marche), noter que celles-ci ne s'opposent par forcément au mouvement, bien au contraire !

I) Actions de contact

1) *Modèle macroscopique* : définir les différentes composantes de la force et du moment de l'action de contact, ainsi que le plan tangent commun, etc ... signification des différentes composantes, comme résistance à un mouvement donné, avec présentation des mouvements associés sur une boule (interpénétration, glissement, roulement, pivotement).

2) *Origine des forces de frottements* : de nature électromagnétique, mais impossible à calculer en pratique. Vont beaucoup dépendre de la forme de la surface. Force non donnée, mais on va pouvoir développer certaines lois.

3) *Approximation du contact rigoureusement ponctuel* : présentation, ce n'est qu'une approximation, on n'a plus de moment (CPGE). Remarque sur le cas des surfaces planes, lois indépendantes de la surface de surface de contact. Évoquer le concept de déformations microscopiques.

II) Lois du frottement solide

Introduction par expérience du stylo qu'on penche et qui glisse à partir d'un certain angle, avec notion intuitive de cône de frottement. On va expliquer ça par la suite.

1) *Loi de Coulomb* : présentation des deux cas. retour sur manip avec calcul. Présentation du coefficient de frottement avec l'angle du début de glissement.

2) *Coefficients de frottements* : dynamique/statique, OdG, explication de la différence entre eux (modélisation microscopique, et note sur l'échauffement qui ne m'a d'ailleurs jamais bien convaincu), note sur la rupture de force un peu bizarre, cas des glissements sans frottements, roulement sans glissement.

3) *Aspect énergétique* : P négative indépendante du ref, P_1 et P_2 de signe quelconque, cas GSF et RSG

4) *Au delà du contact ponctuel* : on admet Coulomb vrai de façon élémentaire, contact plan/plan où Coulomb est valable globalement pour la vitesse de groupe (peut se démontrer facilement par intégration si on admet la propriété précédente), articulation rotoïde, avec retour sur les frottements et signe des différentes puissances.

III) Premières application du frottement

1) *Statique et cône de frottement* : présentation du cône, arc-boutement, exemple sur les vis à bois ou à métal.

2) *Marche à pied* : explication simple. Puis exemple du lit qui avance : on sait que quand on veut faire avancer son lit qui a bougé, on se lance progressivement en avant, avant de se freiner brutalement sur le lit, ce qui le fait avancer par petit sursaut. On arrive à faire avancer le lit en le soumettant en moyenne à la même force dans chaque direction ! C'est dû au fait que sur la phase d'accélération vers l'avant, la force peu importante permet de rester dans les frottements statiques, alors que pendant le freinage brutal, la force fait passer dans le cas dynamique. Généralisation aux hystérésis qui permettent une mise en mouvement.

3) *Roue motrice* : exemple du Pérez, faire des considérations justes et propres.

IV) La règle de Sommerfeld

Mise en équation et résolution, considérations physiques (se trouve dans les problème du Tout-en-un, ou dans la moitié des livres de méca).

Commentaire : Cette leçon avait été faite parmi les premières. Rétrospectivement, le contenu y est, mais il faudrait faire un plan plus sympathique, comme étudier un exemple pendant la partie présentant les lois du frottement, et faire un plan un peu moins artificiel.

Commentaire : Il peut être intéressant de rajouter ici l'exemple du pot de confiture, qui est plein de physique. Un bilan propre de force entre la main et le couvercle et le couvercle sur le pot n'est pas évident, il y a des coefficients de frottement entre des surfaces différentes à prendre en compte, et le cas d'un objet soumis à des frottements sur deux surfaces différentes (le verre et la main). On peut raffiner en évoquant le fait de mettre un torchon, sur ce qui change les coefficients de frottement et rajoute une surface, ou évoquer la main mouillée, ce qui peut être modélisé en changement les coefficients de frottement, avec ouverture sur la lubrification, qui est importante dans l'étude des frottements (comment le fait de mettre un liquide entre les deux surfaces change le coefficient de frottement, avec sens du changement, et interprétation microscopique).

LP 2 : Caractère non galiléen du référentiel terrestre

Bibliographie : Gié, Pérez, BFR, Tout-en-un sup ancien programme PCSI un chapitre y est dédié

Niveau : Licence ? Ce n'est plus au programme de classe prépa actuel Oo

Pré-requis : Mécanique du point et du solide, Dynamique en référentiel non galiléen

Remarque : D'aucuns m'ont demandé "en quoi les forces de marées sont un effet non Galiléen, puisqu'on peut les voir simplement comme force différentielles gravitationnelles". Pour commencer, il est important de noter que la leçon s'intitule "caractère non galiléen du référentiel terrestre", et que le rapport précise d'ailleurs bien que ce n'est pas une leçon sur les référentiels non galiléens. Dans ce cadre, et après avoir présenté le référentiel terrestre, tout terme qui viendrait s'ajouter au PFD galiléen lorsque qu'on considère ce référentiel est une contribution non-galiléenne. Après, savoir si on le met devant coriolis ou pas est un choix, bien sûr, et tout faire est à mon avis un peu long pour une leçon. Indépendamment de cette première réponse, et pour ce qui est de dire que c'est une force gravitationnelle non-différentielle, et pas un effet non-galiléen, c'est simplement une interprétation due au choix de référentiel. Si je me mets dans un référentiel tournant, la force d'inertie compense l'attraction, et je comprends pourquoi la terre ne tombe pas sur la lune (et réciproquement), et le différentiel apparaissant entre cette force d'inertie en r et la force gravitationnelle en r^{-2} crée les marées, interprétées comme un effet de référentiel non galiléen.

I) Principaux référentiels, et caractère galiléen

1) *Principaux référentiels* : Copernic, héliocentrique, géocentrique, terrestre

2) *Caractère galiléen* : on va supposer Copernic galiléen, explication de sur quelles durées on a des TRU, et temps caractéristiques sur lesquels on peut assimiler les référentiels comme galiléen, OdG. En effet, un référentiel est galiléen sur une durée caractéristique pendant laquelle il effectue une TRU par rapport à un autre référentiel inertiel. Typiquement, sur une trajectoire circulaire, quand la distance parcourue est très petite par rapport au rayon de courbure de la trajectoire, le référentiel est à peu près galiléen. C'est très facilement visualisable dans le cas de la terre qui tourne autour du soleil, et dans le cas de la surface de la terre qui tourne autour du centre de celle-ci.

3) *Référentiel terrestre* : présentation plus complète, pôles, valeurs des différentes contributions, vitesse de rotation de la terre.

II) Gravité locale, notion de verticale

1) *Champ de pesanteur terrestre* : prendre un objet fixe par rapport à la surface de la terre, définition du champ de pesanteur, calcul en fonction de la latitude. On met volontairement ici de côté le terme de marée (à savoir la différentielle du champ gravitationnel extérieur à la terre entre le point en surface et le centre de la terre).

2) *Application* : verticale, forme de la terre, avec les mains car pas le temps, faire un joli dessin de la terre aplatie. En terme d'OdG, il peut être intéressant de donner la distance entre le point de la Terre pointé par une verticale locale et le centre géométrique de la Terre.

3) *Correction à la verticale* : déviation vers l'est pour les chutes libres dues à Coriolis, calcul. Peut être fait soit avec la chute en référentiel non galiléen, soit avec la chute avec vitesse initiale dans le référentiel géocentrique, pris galiléen pour la durée de l'expérience. La comparaison entre les deux méthodes peut être intéressante pour mettre en avant la différence entre les deux référentiels.

III) Effets de marée

1) *Présentation rapide, schéma* : Noter qu'on ne met souvent que la force de la lune et/ou du soleil dans le calcul, mais que pour être fait de manière très générale, il faut simplement prendre la force de tout le reste de l'univers, et estimer le différentiel. Pour justifier le modèle pris, on peut par exemple quantifier l'effet de Mars par rapport au soleil ou à la lune.

2) *Calcul* : Utiliser des notations propres et efficaces, qu'on peut introduire soi-même si nécessaire, il n'est pas question de traîner des termes infâmes et mal adaptés. Faire de jolis dessins.

3) *OdG* : notamment pour la hauteur d'un homme, la tour Eiffel, le Mont Blanc, fréquence des marées, etc ...

IV) Effets de la force de Coriolis

1) *Dans quels cas la prendre en compte* : par comparaison des différents termes en jeu, on obtient facilement une taille caractéristique, OdG.

2) *Déviations des trajectoires par la force de Coriolis* : Le faire de façon très intuitive, avec un joli dessin, et sans se tromper avec les produits vectoriels.

3) *Applications* : obus, météorologie (cyclones, anticyclones, cellules de Hadley ...), courants, etc ... L'exemple du pendule de Foucault au pôle nord est simple et intéressant. Une résolution complète se trouve notamment dans le tout-en-un PCSI ancien programme, pour se mettre au point un peu plus si on compte en parler pendant la leçon.

LP 3 : Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopiques et microscopiques

Bibliographie : Pérez de mécanique, BFR de mécanique, Cohen, Gié

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique du point et du solide, formalisme des matrices d'inertie, base principale d'inertie, bases de mécanique quantique. Les angles d'Euler doivent aussi être connus, sinon c'est trop galère.

Introduction : mouvement d'une toupie, pourquoi ne tombe-t-elle pas ? C'est ce qu'on va essayer de comprendre

I) Cadre de l'approximation gyroscopique

1) *Mouvement d'un solide autour d'un point fixe* : présentation, cela peut-être autour d'un point fixe, mais aussi dans son référentiel barycentrique par rapport au centre de gravité, donc très utile. Équation du mouvement, a priori très compliquée !

2) *Repères utiles* : repère galiléen pour l'étude, mais aussi le repère principal d'inertie. On rappelle comment on effectue une dérivation dans un repère tournant. Montrer sur le gyroscope, notamment les angles d'Euler.

3) *Approximation gyroscopique* : on suppose symétrie de révolution, approximation. OdG sur une toupie, on voit bien que c'est vérifié. Objets sur lesquels on va pouvoir l'appliquer, par exemple une roue de vélo. Attention, techniquement, l'approximation gyroscopique telle que formulée, notamment dans le Pérez, est fautive ; il faut revenir aux équations pour voir quelle termes on néglige devant d'autres, et on voit qu'en plus des dérivées temporelles des angles, apparaissent aussi les moments d'inertie qui peuvent jouer un rôle, notamment lorsqu'on néglige les moments cinétiques.

II) Étude du mouvement

1) *Caractéristiques du mouvement* : équation, et invariances. On reconnaît une équation de précession

2) *Mouvement de précession* : précession, vitesse angulaire de précession, manipulation. Dire que cela peut sembler paradoxal : le déplacement ne se fait pas dans la direction de la force, mais dans un plan perpendiculaire Oo C'est en pratique très utile. Retour sur l'approximation gyroscopique.

III) Utilisation dans les domaines macroscopiques

1) *Stabilité gyroscopique* : roue de vélo, balle qu'on lance, toupie. Utilisation pour équilibrer les bateaux, calculer la réaction (BFR), on voit bien que le mouvement est contrebalancé !

2) *Gyroscope* : outil construit rien que pour ça, sans aucune force. Permet de détecter des directions absolues. Utiliser dans le guidage d'avions, ou par exemple pour détecter la rotation de la terre. Faire tourner le plateau avec le gyroscope en marche dessus, c'est magique ! Compas gyroscopique, cf Gié. OdG. Meilleur gyroscope utilisé pour détecter des effets gravito-magnétique prédits par la RG, gravity prob B.

3)* *Précession des équinoxes* : mais bon, exemple archi-classique, « semi ».

IV) La résonance magnétique nucléaire

1) *Présentation* : le faire. Dire qu'en fait on étudie un mouvement gyroscopique, mais qu'aucune approximation gyroscopique n'est faite dans un traitement quantique.

2) *Application d'un champ tournant* : faire le calcul dans le référentiel tournant, blablabla.

3) *Résonance magnétique nucléaire* : à la bonne fréquence, le champ initial est annulé, c'est fantastique ! En pratique, une relaxation après utilisation de la RMN permet de mesurer la fréquence de résonance, qui donne des informations sur le facteur gyromagnétique du noyau considéré, et donc de son environnement proche.

4) *Utilisation de la RMN*

Remarque : On a souvent tendance à oublier que le fait de pouvoir décrire totalement l'état cinématique du solide par un simple torseur, le torseur cinématique, décomposable en un glisseur décrivant la rotation instantanée et un couple décrivant la translation, est intrinsèquement lié au fait de décrire un

solide. En effet, il est équivalent d'énoncer que la formule de Varignon permet de décrire le mouvement total d'un solide et d'énoncer que son champ de vitesse est équiprojectif, soit que $\forall P, Q$ appartenant au solide, $\vec{V}(P) \cdot \vec{PQ} = \vec{V}(Q) \cdot \vec{PQ}$. Et cette dernière propriété provient directement du fait que deux points du solide restent à une distance constante au cours du temps, soit sa définition même. On peut aussi exprimer cela en utilisant le fait que les rotations et les translations sont les seules isométries continues de l'espace Euclidien.

LP 4 : Lois de conservation en dynamique des système

Bibliographie : Tout-en-un Dunod MP/MP*, Landau de Mécanique, sa bite et son couteau

Niveau : MP

Pré-requis : Mécanique et énergétique du point et du solide

Remarque : J'ai choisi de construire cette leçon dans le but de faire sentir toute la profondeur et la puissance des lois de conservation, ce qui n'est pas forcément toujours évident en utilisant un formalisme très classique, tel celui utilisé en classe préparatoire. Pour bien comprendre ce choix de plan, il est très important de maîtriser un peu la théorie sous-jacente. Pour cela, le début du Landau de mécanique est une référence absolue. On y trouvera notamment comment le Lagrangien d'un système classique simple est déterminé de façon quasi-univoque dans un espace homogène isotrope, avec un temps absolu et homogène, et avec comme hypothèse la relativité galiléenne. A partir de cela, et sous les mêmes hypothèses, la conservation de l'impulsion et du moment cinétique découlent naturellement de l'homogénéité et l'isotropie de l'espace (ce qui est équivalent à l'invariance par translation et rotation). Passant en formalisme Hamiltonien, et écrivant grâce aux équations de Hamilton que la dérivée totale par rapport au temps du Hamiltonien est égale à sa dérivée partielle par rapport au temps, on arrive aussi directement sur le fait que l'homogénéité du temps (et donc l'invariance du Hamiltonien par translation temporelle⁷) donne la conservation de l'énergie totale du système. Il peut être intéressant de connaître aussi les formulations simples du Théorème de Noether, qui est en fait omniprésent dans ce type de considérations physique.

Remarque : On suivra sur toute la leçon l'exemple du système à deux corps, avec une force centrale, et on verra que tout au long de l'exposé, on aura de plus en plus de résultats simplement avec les lois de conservation.

I) Conservation de la quantité de mouvement

1) *Conservation de la quantité de mouvement :* TRD sur système isolé, découle de l'homogénéité de l'espace, cas M cste, rq pseudo-isolé, Odg recul fusil. Visualisation par potentiel : en effet si on suppose que les forces ne découlent que d'un potentiel, on peut visualiser facilement que si le potentiel est indépendant d'une coordonnée (et donc que la physique est invariante par translation sur cet axe), l'impulsion est conservée sur cette coordonnée ; sans être une démonstration exacte, cela met bien de façon simple en exergue le lien entre invariance et conservation. Lien avec l'homogénéité de l'espace. Remarque sur le fait qu'en pratique, c'est toujours vérifié, et qu'on ne peut pas y échapper.

2) *Exemple :* pêcheur sur une barque, inspiré d'un exo du tout-en-un 6-A-9. On prend un pêcheur sur une barque, la réaction de l'eau sur la barque compense le poids (en fait la poussée d'Archimède), et on suppose qu'il n'y a pas de frottements sur la barque ; le système est donc pseudo isolé. Le pêcheur se déplace sur la barque, par exemple pour déposer un poisson, et la barque se déplace dans l'autre sens. Et on note qu'après intégration, le résultat ne dépend que du déplacement total de la barque. Mais ce qui est très fort, c'est que le pêcheur peut faire des petits sauts, trainer des pieds, sauter d'un coup, ramper, etc ... la barque se sera TOUJOURS déplacée de la même distance. En pratique, cela peut être reformulé par l'immobilité du centre de masse du système total. Cas limites, notamment même masse, masse du pêcheur négligeable (quand on marche sur un porte-avion, il ne se déplace pas), et masse du bateau négligeable (le pêcheur reste immobile, et le bateau se déplace sous lui). Si le pêcheur souhaite plonger, la barque va alors partir dans l'autre direction, et il aura de même beau plonger comme il le souhaite, la vitesse de la barque ne dépendra que de sa vitesse après le saut. On note le caractère inéluctable des lois de conservation, c'est très puissant, et en fait un peu contre-intuitif.

3) *Application au système à deux corps :* On peut étudier de même que précédemment le mouvement du centre de masse. Il est forcément en TRU car conservation de l'impulsion totale, le système étant isolé. C'est vrai quelque soit la force qui relie les deux masses.

4) *Application aux chocs :* choc, définition, écriture de la force comme la percussion, force très importante sur un intervalle de temps très court, dont la variation de la quantité de mouvement est l'intégration. En pratique, écrire que sur le choc seule la percussion est non négligeable est équivalent à la conservation de la quantité de mouvement de l'ensemble des deux masses qui choquent. Attention aux forces non données, elles ne sont pas forcément négligeables sur le choc, et on n'a alors plus conservation. Cas des chocs

7. En fait, on peut aussi directement le voir au niveau du Lagrangien, supposant qu'il est bien invariant par translation temporelle, cf Landau, mais je préfère le niveau Hamiltonien.

élastiques/inélastiques, écriture des lois de conservation qui donnent des contraintes qu'on peut dénombrer, cas du réf du centre de masse, où un choc élastique ne fait que tourner les impulsions. On note que tous ces résultats ne dépendent pas de la force entre les deux solides !

II) Conservation du moment cinétique

1) *Loi de conservation* : TMD sur système isolé, sur axe et sur point, rq sur pseudo-isolé. On note qu'ici c'est différent de la conservation de l'impulsion, car on peut modifier le moment d'inertie, alors qu'on ne peut pas modifier la masse, donc on aura des effets un peu différents. Visualisation par potentiel, on prend un potentiel invariant par rotation autour d'un axe dans des coordonnées cylindriques, et on voit que les forces sont soit portées par la verticale, soit dirigées vers l'axe central, ce qui donne un moment par rapport à cet axe qui nul. Cela met bien en exergue que l'invariance par rotation du système autour d'un axe donne la conservation du moment cinétique autour de cet axe. Lien avec l'isotropie de l'espace. C'est une loi générale de conservation, on ne peut pas l'éviter !

2) *Scarabée sur un plateau* : On prend un plateau en forme de disque horizontal, relié en son centre par une liaison parfaite à un axe, et un scarabée marche sur ce plateau, inspiré de 6-A-10. On montre que le moment cinétique du tout autour de l'axe central est conservé. Le scarabée marche autour du plateau, cela fait tourner le plateau. Résolution de même que le pêcheur. On voit que le déplacement ne dépend que du déplacement relatif du scarabée, il a beau sautiller, trainer des pattes, ramper, etc ... le déplacement sera toujours le même ! Caractère inéluctable des lois de conservation. Par contre il peut changer de rayon au cours de la trajectoire, et donc changer son moment d'inertie, on voit la différence avec le I). De même, si il décide de sauter du plateau, le plateau va se mettre à tourner, de façon indépendante de la façon dont le scarabée saute ou s'envole. Par contre, en fonction de l'angle avec lequel le scarabée part, on n'aura pas le même résultat, différence avec le I). Cas extrémaux, masses négligeables l'une par rapport à l'autre, tripper un peu :)

3) *Tabouret d'inertie* : Prendre deux masses et les tourner à bout de bras : le tabouret tourne. Changer le moment d'inertie quand on revient, en ramenant les masses sur soi, on peut faire tourner le tabouret, différence avec impulsion. Faire tourner le tabouret, et changer son moment d'inertie en cours de rotation, on voit qu'on a bien conservation du moment cinétique et que la vitesse de rotation change. Mettre une roue de vélo alourdie en rotation autour d'un axe horizontal, la mettre à la verticale, on va tourner dans l'autre sens pour conserver le moment cinétique autour de la verticale.

4) *Application au système à deux corps* : on va supposer force centrale : mouvement plan, loi des aires, quelle que soit la force, c'est un résultat général !

III) Conservation de l'énergie

1) *Loi de conservation* : TCEM, démonstration, note sur le fait que la conservation de l'énergie est due à l'invariance par translation temporelle, mais que c'est l'énergie totale, a priori. Remarque sur les système à un degré de liberté, qui se résolvent à vu avec ce théorème.

2) *Application au système à deux corps* : si force dérive d'un potentiel central, on peut écrire un potentiel effectif grâce à la conservation du moment cinétique, problème à un degré de liberté, résolution systématique par intégrale qui donne la solution analytique, forme des trajectoires à partir de l'étude du potentiel, trajectoire liée et de diffusion, trajectoire circulaire au(x) minimum(a) d'énergie potentielle, r_{min} pour une énergie donnée qui est dû à la barrière cinétique. Bien noter qu'on a juste supposé que la force dérivait d'un potentiel central, rien de plus, et qu'on a énormément de résultats !

3) *De la conservation de l'Em à la thermodynamique* : exemple de voiture électrique, cas des deux cylindres, haut qui chute sur bas qui tourne, perte d'énergie, cf 8-6 du tout en un, échauffement. En pratique, c'est l'énergie totale qui est conservée, et si on veut faire des bilans, il va falloir faire de la thermodynamique !

Conclusion : appuyer sur tout ce qu'on a obtenu en ne supposant quasiment rien sur les forces centrales → C'est TRÈS PUISSANT ! S'extasier les larmes aux yeux de la beauté de la mécanique.

LP 5 : Cinématique relativiste

Bibliographie : Landau, Feynman, Gié, et d'autres livres utiles

Niveau : Licence 3

Pré-requis : Mécanique classique, Électromagnétisme

Remarque : La cinématique est l'étude de la description des mouvements dans l'espace, donc autant de la description de la position des points que leur évolution dans le temps. Noter de plus que de toute façon, en relativité spéciale, le terme d'évolution dans le temps n'a plus de sens, et que la seule description possible est celle de la trajectoire le long de la ligne d'univers. Il n'est donc absolument pas gênant de passer du temps sur la description du repérage dans l'espace-temps, et la composition des vitesses, même si il est préférable de la faire, n'a pas du tout un caractère central dans cette leçon.

I) Les principes de la relativité restreinte

1) *Historique* : relativité galiléenne (mécanique classique), transformation des vitesses, temps absolu

2) *Incompatibilité avec l'électromagnétisme* : Maxwell donne une vitesse absolue de la lumière, pas compatible avec transformation classique des vitesses, problème! De plus, les équations de Maxwell ne sont pas invariantes par la transformation de Galilée. Tentative d'introduction d'un référentiel privilégié, éther, résultats expérimentaux

3) *Les principes de la relativité restreinte* : principe de relativité, invariance de la célérité de la lumière. Mais les transfo des vitesses ne sont plus valables, tout comme celle des positions. On va en chercher qui laissent invariantes ces nouvelles lois physiques prises comme nouvelle base, à savoir :

II) Transformation de Lorentz

1) *Notion d'événement* : Bien insister sur la notion d'événement, en donnant des exemples probants, comme le fait de claquer des doigts ici, en appuyant sur le caractère «ici et maintenant». Problème, le temps n'est plus absolu, c'est une nécessité, notamment pour l'invariance de la vitesse de la lumière. On ne peut plus décrire séparément temps et espace, et décrire simplement la position au cours du temps. On va donc introduire la notion d'événement, et d'espace-temps.

2) *Transformation de Lorentz* : on se restreint à 1d pour plus de simplicité, mais c'est la même chose. Présentation, remarques multiples et variées. Facteurs gamma et beta, limite non-relativiste

3) *Temps propre* : Ça semble une aberration, mais c'est en fait une nécessité pour avoir l'invariance de la célérité de la lumière! Il a bien fallu abandonner un temps absolu. Exemple sur le wagon de train qui avance avec un photon qui fait des aller-retours entre deux miroirs, formule. Pareil par Lorentz, dilatation des durées par rapport au temps propre. Différence avec un temps absolu, jumeaux de Langevin, expérience de Feynman avec les muons cosmiques. Bien mettre en avant que pour les lois physiques autres que la description du mouvement, seul le temps propre compte, que c'est le « temps local » à prendre en considération. D'ailleurs, on pourra de façon amusante noter que si on prend comme hypothèses le principe de relativité Galiléenne et le changement de référentiel Galiléen impliquant un temps absolu, alors on a obligation d'imposer l'instantanéité des interactions fondamentales; en effet, si ce n'était pas le cas, la vitesse de propagation dépendrait du référentiel Galiléen, ce qui est incompatible avec le principe de relativité associé!

4) *Contraction des longueurs* : aller vite, et ne pas perdre de temps. Exemple de la règle d'Einstein, par exemple. Normal pour invariance de c , que dans la direction du déplacement.

III) Notion d'intervalle, espace-temps, causalité

1) *Intervalle* : de même, la distance géométrique n'a plus de sens, il faut autre chose qui soit invariant relativiste, car on cherche à présent à décrire la physique par des quantités qui ne dépendent pas du référentiel inertiel qu'on va choisir. L'exemple de l'arbre par Feynman transformé en celui du tableau par Herouanne, présenté de façon convaincante, est particulièrement intéressant. Présentation, toujours nul pour deux événements reliés par un rayon lumineux. C'est vrai de façon générale, démo par Lorentz.

2) *Diagramme d'espace-temps* : présentation, différentes zones, noms, exemple du soleil qui s'éteint, seul les définitions invariances relativistes comptent. Bien noter que c'est un diagramme par rapport à un point central de position et de temps fixé. Intervalle de genre temps, espace, lumière, définitions. Bien noter que pour définir le futur et le passé, seul le fait d'être dans le cône de lumière futur ou passé compte.

Si on est dans l'ailleurs, on peut avoir un temps qui est postérieur au temps du centre du diagramme, mais une transfo de Lorentz peut nous ramener à un temps antérieur : la notion de futur ou de passé n'a pas de sens dans l'ailleurs ! Noter qu'on peut ramener un intervalle de genre espace à un événement qui se situe au même temps que le centre du diagramme par une transfo de Lorentz adaptée. De même, on peut ramener un intervalle de genre temps à un événement qui se situe au même endroit que le centre du diagramme, mais à un temps antérieur ou postérieur selon qu'on se situe dans le cône de lumière futur ou passé. On conclue en disant que le diagramme d'espace-temps est très efficace pour décrire de façon relativiste la physique, et sa structure causale : un événement qui est dans l'ailleurs, le passé, le futur, ou sur le cône de lumière y reste par n'importe quelle transformation de Lorentz.

IV) Déplacements relatifs

1) *Composition des vitesses* : introduction par impossibilité de dépasser c , nouvelle formule. Démo, remarques sur les différentes limites, coureur qui croise un petit photon errant, etc ... !

2) *Effet Doppler relativiste* : étude complète, en profiter pour tripper et réutiliser toutes les notions introduites précédemment.

Commentaire : Pour bien comprendre la notion d'espace-temps et d'invariance, il peut être intéressant d'observer comment changent les axes d'un diagramme d'espace-temps lors d'une transformation de Lorentz, et de bien de se mettre en tête que les événements pointés dessus ne changent pas de localisation. La dilatation des temps et la contraction des longueurs, ainsi que l'invariance de l'intervalle, deviennent toutes naturelles. Il est cependant déconseillé de se lancer dans ces explications à l'oral, car d'une part les expressions mathématiques ne sont pas évidentes à manipuler, et d'autre part les notions de covariances et contravariances qui rentrent en jeu dans la projection sur les bases nécessitent d'avoir été travaillées plus que lors d'une simple première approche de la relativité spéciale.

LP 6 : Dynamique relativiste

Bibliographie : Landau, Gié, Feynman, etc ...

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique classique, cinématique relativiste, électromagnétisme

Remarque : Pour cette leçon, ce n'est pas forcément optimal de noter les quadrivecteurs avec les indices covariants et contravariants, et notamment d'écrire les produits scalaires comme des contractions entre vecteurs et formes. D'une part, cela demanderait des justifications supplémentaires parfois un peu lourdes, surtout à ce niveau, et cela demanderait d'autre part à ceux qui n'ont qu'une première approche rudimentaire de la relativité de devoir justifier des choses qui les dépassent probablement. La notation prise dans le Gié, avec des \sim au dessus des quadrivecteurs, apparaît comme tout à fait adaptée pour une première approche de ces 4-vecteurs, sans avoir à trop entrer dans des détails techniques.

Remarque : Pour cette leçon, et notamment pour la justification des invariances relativistes, et des considérations intrinsèques de quadrivecteurs, il est hautement conseillé de se ramener souvent à la physique classique et son sympathique espace euclidien tridimensionnel, où il est bien plus simple de comprendre qu'un vecteur existe indépendamment de la base dans lequel on le repère, et que la description d'un scalaire, comme la température en un point à un temps donné, ne dépend pas du repère dans lequel on se place **même si la description de ce point est différente !**

Introduction : on a vu la cinématique relativiste, mais on voit que les équations de la dynamique doivent aussi être changées. En effet, sinon un corps uniformément accéléré dépasserait au bout d'un certain temps la vitesse de la lumière.

I) Les quadrivecteurs en relativité

1) *Les scalaires :* exemple sur l'intervalle, indépendant du référentiel dans lequel on le considère. C'est bien un invariant relativiste. Comparaison au cas classique, notamment de la distance entre deux points. Donner comme autre exemple la masse d'une particule⁸. Il est dangereux à ce point d'évoquer des champs scalaires, ce qui est inutile, et de faire trop rapidement une généralisation relativiste à la température ou à la pression.

2) *Notions de quadrivecteur :* exemple sur la position quadrivectorielle, en fait une entité en soit, sans qu'on ait besoin d'un repère particulier. Définition comme toute entité qui se transforme comme la position sous les transfo de Lorentz, en effet, ce sera bien une entité intrinsèque. Similitude avec les vecteurs de l'espace : de même je sais que le champ électrique \vec{E} existe indépendamment d'un repère; je peux le représenter dans un repère, cela ne va pas changer le vecteur, même si sa description va être différente. C'est la même chose pour les quadrivecteurs. Représentation intrinsèque ou dans une base. Changement de repère.

3) *Quadrivecteur vitesse, produit scalaire :* présentation : on va dériver la position par rapport à un invariant relativiste, le temps propre. Noter que beaucoup de définitions existe, prendre systématiquement celle qui est homogène à la grandeur considérée. Propriétés, produit scalaire : on crée un scalaire, qui ne dépend pas du référentiel, et qui est donc invariant. Cas pour la quadrivitesse. Ce sera le cas pour tout produit scalaire de vecteur. Comparaison avec les vecteurs de l'espace, on sait bien que $\vec{E} \cdot \vec{B}$ ne dépend que du point auquel je le considère, et que c'est un scalaire qui ne dépend pas de la base que je considère pour représenter les vecteurs.

4) *Quadrivecteur énergie impulsion :* Introduction physique, identification du terme temporel, du terme spatial. Énergie totale, énergie cinétique, considérations sur la masse (définition propre, être conscient des subtilités), énergie en mouvement, énergie au repos.

5) *Relations sur l'énergie en relativité :* produit scalaire et invariant relativiste. Considérations physiques sur la relation obtenue, cela est toujours vrai, et ne dépend que la particule considérée. Particules de masse non nulle, particules de masse nulle, limite ultra-relativiste.

8. NB : différence entre les définitions des masse selon l'école que l'ont vénère, cf notamment la version de Feynman, être conscient de ce qu'on utilise comme définition. La définition dans l'école française de la masse est ce qu'on appelle plus précisément la masse au repos. Cependant, Feynman inclus le facteur γ dans la masse, et c'est pour lui la masse au repos fois ce facteur. Être au point sur ce genre de subtilité.

II) Lois de la dynamique

1) *Principe fondamental de la dynamique* : idée, on veut quelque chose de similaire au cas classique (puisque la limite NR doit être la même), mais qui est indépendant du ref d'étude, on ne doit donc avoir que des quadrivecteurs. Donc dérivation par rapport à la distance sur la ligne d'univers, ou plus simplement au temps propre, si on préfère. Écriture du PFD. Ce qu'on met à droite ? Quadriforce. On a donc le PFD, il va falloir l'identifier.

2) *Quadriforce* : identification du terme spatial. PFD en spatial. Noter que seul un terme change, mais que l'accélération n'est donc plus parallèle à la force, et que l'inertie augmente avec la vitesse de la particule. Quelles forces ? Pas gravité, mais électromagnétisme, la force de Lorentz est relativiste (noter que de toute façon, il faut faire ici une vérification expérimentale, car la physique est science naturelle). Interprétation du terme temporel, obtenue par invariance de la norme de la quadriimpulsion. PFD sur la dimension temporelle, énergétique, cela justifie l'identification antérieure qu'on avait faite de l'énergie.

3) *Lois de conservations en relativité* : écrire quand on n'a pas de force, conservation de l'impulsion comme quadrivecteur, contient l'impulsion spatial et l'énergie. Remarque sur les invariants : toute produit scalaire. Différence entre quantités conservées et invariantes.

III) Mouvement de particule dans des champs électromagnétiques

1) *Champ électrique constant* : résolution classique, problème. Résolution relativiste, cf Landau, en maniant proprement les formules, sans passer par une intégration immonde du PFD. Trajectoire. Limite non-relativiste, ultra-relativiste, différence. On note que la vitesse perpendiculaire au champ change, c'est bien ce qu'on avait dit en étudiant le PFD, c'est nécessaire pour que la vitesse totale ne dépasse pas la vitesse de la lumière. On voit aussi que l'inertie augmente bien avec la vitesse de la particule. En pratique, rayonnement !

2) *Champ magnétique constant* : prendre perpendiculaire à vitesse initiale. Résolution. Comme classique, noter simplement le facteur relativiste, qui augmente l'inertie de la particule.

3) *Application aux accélérateurs de particules* : présenter dans ce nouveau contexte les cyclotrons et les synchrotrons, ordre de grandeur des performances, exemple du LHC. Noter que le grand rayon permet surtout d'éviter un rayonnement trop important.

IV) Chocs de particules

Cadre de l'étude : définition de choc, système pseudo isolé, temps très court, et qu'on suppose localisé dans l'espace.

1) *Méthode de résolution* : on ne connaît pas les forces, mais ce n'est pas important. Dénombrement du nombre d'équations et d'inconnue. Choix du référentiel : doit être judicieux ! Référentiel du centre de masse.

2) *Énergie de seuil* : faire le calcul pour apparition d'une particule. Application à la création d'une paire proton-antiproton lors d'une collision.

LP 7 : Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux

Bibliographie : Pérez, Tout-en-un PC ou PSI, Hulin Guyon Petit, Gié PC-PC* (jaune)

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Mécanique, thermodynamique, phénomènes de transport (notamment la diffusion), cinématique des fluides

Introduction : on appuiera sur les forces transverses et le caractère diffusif de la viscosité.

I) Notion de viscosité

1) *Expérience introductive* : bac de glycérine, colonne d'encre. Expliquer proprement toute l'expérience, bien attendre le régime stationnaire pour faire l'analogie mathématique. Dire qu'on a bien mise en mouvement des couches inférieures par frottements des couches supérieures. Évoquer dès maintenant le régime transitoire, et les conditions aux limites.

2) *Loi de Newton* : Préciser toutes les hypothèses, notamment le fait qu'on travaille avec un fluide Newtonien, ce qu'on fera dans la suite. Schéma propre, toujours préférer un volume élémentaire à une surface élémentaire, lorsqu'on fait des bilans de force. Préciser que c'est une loi phénoménologique, et qu'on y reconnaît un effet d'ordre 1.

3) *Viscosité* : faire la différence entre cinématique et dynamique, unités. Donner des ordres de grandeur (il y en a un peu partout).

4) *Interprétation microscopique* : faire un exemple pour des gaz dilués, parler de transfert de quantité de mouvement du à l'agitation microscopique. Noter caractère diffusif, comme on va le voir par la suite ; par contre ici on transporte une grandeur vectorielle, donc ça va être plus compliqué à décrire, et on va se restreindre à des exemples simples, pour ne pas à avoir à subir des outils mathématiques un peu lourds, et moins intuitifs (les tenseurs). Analogies : à savoir qu'on va homogénéiser la quantité de mouvement, mais seulement par frottements latéraux. Faire très attention quand on parle de réversibilité, car les écoulements à tout petit Reynolds sont réversibles. Il est peut-être préférable de ne pas en parler ici d'ailleurs. Définir le courant de diffusion de quantité de mouvement en géométrie simple, et bien donner l'analogie avec la loi de Fourier. Cette analogie sera développée plus tard. Donner la dépendance en température, via modèle microscopique pour les gaz. Pour les liquides, la grande viscosité est due aux interactions entre les différentes molécules ; quand la température augmente, le comportement gaz gagne sur celui liquide (agitation thermique contre forces de VdW), et on va donc perdre en viscosité (ne pas faire de confusion avec le fait que la viscosité augmente avec la température pour les gaz, car c'est en effet d'ordre 1 en comparaison du fait de déjà tendre pour les liquides vers la viscosité des gaz qui est bien inférieure à la leur).

II) Dynamique des fluides visqueux

1) *Forces volumiques de viscosité* : Identifier les différentes forces volumiques. On va supposer que la force normale peut être traitée comme en statique, et s'identifie bien à la pression : on n'y reviendra plus. Faire le développement proprement pour la force latérale. Dire qu'on généralise cela au cas général, et qu'on a bien un terme en laplacien vectoriel de la vitesse (bien noter les différentes hypothèses, notamment l'incompressibilité du fluide).

2) *Équation de Navier-Stokes* : faire le PFD sur une particule de fluide. Considérations sur cette équation, différents termes, caractère non-linéaire, non-trivialité, etc ...

3) *Retour sur l'expérience introductive* : bien poser proprement successivement toutes les considérations faites, et notamment la forme des termes pris. On aboutit bien à un profil de vitesse qui était celui observé. On peut aussi calculer les frottements sur le palet, on obtient bien une loi type Stokes (mais ce n'est pas la loi de Stokes!). Mais c'est ne pas forcément évident de voir le caractère diffusif, pour cela ...

4) *Visualisation de la diffusion* : on prend la plaque oscillante à présent. La résolution se trouve dans le *PC PC* Gié*, le livre jaune. Beaucoup de calculs sont exactement similaires aux précédents, donc on va vite, en fait il faut juste rajouter le terme temporel. Tadaa, équation de diffusion, on retrouve bien ce qu'on veut, rapports de variables type diffusion, etc ... dire qu'avant on avait la diffusion en RP, telle qu'on la vu en étudiant le barreau en contact avec deux thermostats, et l'étude sur les résistances thermiques, et que là on voit le caractère dynamique. On peut aussi se restreindre simplement à la mise

en mouvement, qui met en avant le même caractère dynamique de la diffusion.

III) Nombre de Reynolds

1) *Frottements fluides* : on trouve expérimentalement deux limites, et deux comportements très différents. En fait, ce sont des termes dans l'équation différentiel, ou des comportements physiques, qui sont prédominants. Mais comment savoir lesquels le sont ? On introduit le nombre de Reynolds, et on présente les cas limites. (ne pas perdre de temps à faire tout le blabla sur la courbe présentée dans le tout-en-un).

2) *Nombre de Reynolds* : en pratique, il est très général. Propriétés diverses, notamment le fait qu'il soit adimensionné (normal), et que ça ne sert à rien d'en donner une valeur précise. Rapport entre termes, dans Navier-Stokes, mais aussi pour les courants de diffusion et de convection.

3) *Écoulements à différents Reynolds* : parler principalement des petits nombres de Reynolds, bien donner les propriétés, et des exemples intéressants. Il y a pas mal de choses sympathiques dans le Guyon Hulin Petit.

Commentaire : Bien gérer son temps, car commencer trop tard à parler de Reynolds peut être source de gros problème. Peut-être un petit topo sur les conditions aux limites. Ou alors bien rappeler qu'on les a vu avant.

Commentaire : Au passage, il peut être intéressant de prendre un peu de recul sur le programme de prépa, et de bien se rendre compte qu'en hydrodynamique, et selon le problème étudié, il existe un grand nombre de quantités adimensionnées servant à comparer les différentes contributions régissant la dynamique. La catégorie "Grandeurs sans dimension en mécanique des fluides" de wikipédia pourra en surprendre plus d'un...

LP 8 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Bibliographie : Pérez, Tout-en-un PC ou PSI, Hulin Guyon Petit, Gié PC-PC* (jaune)

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Cinématique des fluides, viscosité, thermodynamique, électrostatique

Remarque : Ne pas faire de faute en écrivant « Bernoulli », ça la fait mal!

I) Écoulements parfaits, couche limite

1) *Écoulement parfait* : description. Dans quel cas on peut considérer qu'on en a un. Différentes propriétés de l'écoulement, etc ... Expliquer proprement pourquoi l'écoulement est isentropique.

2) *Notion de couche limite* : approximation précédente fautive près des obstacles, où les tailles caractéristiques des objets sont beaucoup plus petites. On n'aura donc plus cette approximation, et il faudra considérer une dynamique visqueuse. Diminution brutale du champ de vitesse, taille caractéristique. Considérations énergétiques : c'est là que la dissipation a lieu, donc pas du tout négligeable physiquement. OdG pour une voiture sur l'autoroute.

3) *Conditions aux limites* : il faut prendre en compte tout ce qu'on a fait précédemment pour avoir des conditions aux limites pour notre fluide parfait.

II) Dynamiques des fluides en écoulement parfait

1) *Équation d'Euler* : démonstration à partir de Navier-Stokes. Différentes écritures, notamment avec le vecteur tourbillon/*vorticité*. Donner précisément la définition du terme non-linéaire en le décomposant, et rappeler qu'il est toujours là! Définir ce qu'est un écoulement rotationnel et irrotationnel. Dénombrement des équations et des inconnus, hypothèses simplificatrices, sens physique de chacune des équations et hypothèses.

2) *Premières propriétés* : effet Coanda, le démontrer, et en profiter pour démontrer que les pressions restent statiques sur des courbes perpendiculaires aux champs de vitesse (bien donner précisément les hypothèses). Dire qu'on oublie souvent de le préciser, mais que c'est très utilisé dès qu'on prend des prises de pression latérales.

3) *Potentiel des vitesses* : démonstration pour un écoulement irrotationnel, ça marche bien, et ça permet d'utiliser des outils d'autres domaines, comme ceux de l'électrostatique.

4) *Écoulement autour d'une sphère* : Calcul archi-classique. Le faire proprement, bien justifier les méthodes utilisées. Ça marche bien!

III) Les théorèmes de Bernoulli

1) *Énoncé* : dire qu'il y en a plusieurs, mais qu'on en verra deux seulement. Commencer par démontrer le théorème dans de le cas d'un écoulement parfait, homogène, permanent et incompressible. Dire que c'est le plus utile, et bien appuyer sur les hypothèses. Donner ce que ça donne pour le cas où on rajoute l'hypothèse d'irrotationnalité. Lien avec la conservation de l'énergie, mais on n'aura pas le temps de faire la petite démo dessus.

2) *Effet venturi* : démonstration, effet sur les trombes à eau et stabilité d'une balle dans un jet (ça peut être l'occasion de faire la manip, soit avec de l'air comprimé, soit avec un peu de souffle et une balle).

3) *Sonde Pitot* : calcul rapide, perso ça me blase, mais le faire proprement et efficacement!

4) *Ouverture, Force d'un écoulement sur une sphère* : exo dans le tec&doc Gié PC/PC* jaune, rechercher dans l'index à paradoxe de d'Alembert. Faire le calcul clairement, on n'a pas de force! On est en pratique toujours obligé de prendre en compte la viscosité, notre hypothèse sur l'écoulement est donc pratique, mais trop simpliste pour prendre en compte tous les paramètres.

LP 9 : Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Bibliographie : Diu de Thermodynamique, Hydrodynamique physique, de Hulin Guyon Petit, Pérez de Thermo, Gouttes, bulles, perles, et crary, De Gennes, composition 2004

Niveau : Licence 3

Pré-requis : Mécanique, hydrodynamique, thermodynamique

Introduction : Notre étude s'intéressait jusqu'ici à l'écoulement des fluides ainsi qu'à l'influence des solides sur celui-ci (couche limite, écoulement parfait etc...). On va maintenant s'intéresser à une partie particulière des fluides à savoir leur surface. En fait pas surface mais interface. Séparation entre deux fluides. Bien souvent cela sera air/liquide. Et il arrivera qu'une troisième phase solide participe. Applications : détergents, micro-émulsion, transition de phase, monde du vivant. Question de Mouillage (eau sur les plumes de canard, Hg, Goretex, etc...).

I) Tension de surface

1) *Origine physique de la tension de surface* : Joli dessin, forces intermoléculaires, description par VdW, le différentiel des forces fait que les molécules sont attirées vers le fluide. Elles ont donc un déficit énergétique à rester en surface.

2) *Approche mécanique de la tension de surface* : définir proprement le système, opérateur, surface qu'on tire (attention, il y a deux cotés), coefficient de tension superficielle, OdG et dépendance en température (décroit linéairement avec la température), unité.

3) *Énergie libre et minimisation* : Premier principe sur la lame avec évolution réversible, on abouti sur le lien entre la force et la surface, on peut alors introduire celle-ci dans le potentiel thermodynamique de l'étude, cela permet alors de définir la tension superficielle comme une énergie de surface, remarque sur les unités.

4) *Méthodes de mesure de la tension de surface* : Exploitation de cette notion de minimisation. Par force connue et observation de la forme de la surface. Aussi par force nécessaire pour arracher.

II) Interface statique

1) *Loi de Laplace* : Démonstration pour une bulle de savon avec thermodynamique. Surpression en son sein, généralisation à la goutte et à quand il n'y a plus de symétrie. Expérience avec les bulles de l'agrég, application à la nucléation (Pérez de thermo)

2) *Longueur capillaire* : Longueur caractéristique, par étude d'une goutte d'eau, compétition entre effets gravitationnels et tension de surface. OdG

3) *Mouillage et ménisque* : Angle de mouillage, liquide mouillant et non mouillant, exemples divers et variés. Cependant faire des calculs ici semble un peu lourd, on se réservera pour la partie suivante.

III) Interface dynamique (Composition 2004 et BUP sur la dispersion)

Poser proprement les hypothèses : fluide parfait incompressible, pression, pesanteur, tension superficielle (écriture de la surpression créée par celle-ci, lien avec le début de la partie II, remarque sur la longueur capillaire), linéarisation, écoulement potentiel. On arrive à la relation de dispersion qu'on peut discuter longuement. Régime des ondes capillaires.

LP 10 : Gaz parfait, gaz réels

Bibliographie : Diu de Thermodynamique (tout particulièrement la partie « fluides purs homogènes ») et de physique statistique, BFR de thermodynamique

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis : Mécanique classique, thermodynamique classique.

Remarque : Pour bien effectuer cette leçon, il faut comprendre le caractère fondamental du modèle du gaz parfait : on considère des particules sans interactions, et qui n'interagissent que par des chocs. C'est le fait de négliger les interactions qui donne alors des lois très générales, et en pratique des contraintes très fortes sur la physique du gaz. On prendra un soin tout particulier à séparer ce qui dépend juste de ce modèle, ce qui dépend de la structure interne des molécules, et ce qui dépend des interactions entre molécules. Pour commencer, il est bien important de comprendre les trois définitions des gaz parfaits ; la donnée descriptive du modèle (cf le début de ce paragraphe) ; la définition par l'équation d'état $PV = nRT$; et la définition par les propriétés thermodynamiques, à savoir que U_m et H_m ne dépendent que de la température. Un très bon exercice de thermodynamique, et que je fais d'ailleurs dans cette leçon, et de faire la démonstration de l'équivalence des définitions. On peut noter que cela permet aussi de faire le lien entre la définition cinétique et thermodynamique des grandeurs. Enfin, cela permet d'exprimer clairement tout le sens des détente de JK et JGL, avec en plus une quantification de l'écart à l'idéalité. Bref, il faut être capable de jouer à volonté avec toutes les définitions et de visualiser les différentes contributions de chaque grandeur physique pour bien réussir cette leçon.

I) Vers une description unifiée des gaz

1) *Étude expérimentale* : petite topo historique, avec les travaux de Boyle et Mariotte, et la rapport PV/T qui était initialement considéré comme constant. Montrer la courbe PV/T fonction de P. En fait, tend vers une certaine valeur à basse pression. Le comportement limite à basse pression ne dépend pas du gaz, il est universel (ce qui est important physiquement!), noter la déviation qui est petite même à très haute pression.

2) *Approximation du gaz parfait* : comportement ne dépend pas des particules, et à très basse pression, donc dans un domaine où elles n'interagissent pas ensemble. Ordre de grandeur pour estimer quand on aura cela (mais sans la loi des gaz parfaits, juste avec considérations énergétiques). Très bien vérifié à température et pression ambiante. On va donc essayer de décrire ce comportement limite du gaz, et on traduira les comportements réels par des petites déviations

3) *Gaz réels* : on rajoutera des petites modifications par rapport aux gaz parfaits. On y reviendra, mais on voit que si on tient compte des interactions, on sait déjà que la pression sera plus faible que le gaz parfait à température donnée, et que l'énergie interne sera de même plus faible, à cause des forces d'interactions attractives (OS potentiel d'interaction nul à l'infini). Limite haute pression et basse température : les interactions deviennent tellement forte par rapport à l'énergie d'agitation thermique qu'on change d'état. On peut noter que ça a lieu avant l'apparition du caractère quantique, sauf pour de rares cas, avec ouverture sur les gaz quantiques de fermions (comme l'hélium 3) et de bosons (condensats de Bose-Einstein), mais s'attendre à avoir des questions dessus si on en parle.

4) *Lois de modération* : Caractéristiques générales des gaz, définir la compressibilité isotherme et les deux capacités calorifiques. Elles sont toutes positives, justification heuristique des lois de modérations. Définition de la dilatation volumique et relation de Mayer, lien entre les capacités à pression et volume constante (noter que la dilatation volumique peut être négative, donc ne pas tendre une perche pour se faire frapper).

II) Étude du gaz parfait

1) *Définition, approche cinétique* : on a la définition grossière du « sans interaction et dilué », est-ce qu'on peut revenir à la fameuse équation d'état $PV=nRT$? Oui, nécessité d'une distribution des vitesses. En première idée, on pense à une distribution à la Boltzmann. Donnée. Passage en norme de la vitesse. Ok. Mais sera fastidieux à travailler pour le calcul, et sort de thermodynamique plus avancée en fait. On peut juste travailler avec vitesse quadratique moyenne, cela revient au même tous calculs fait. Le faire, justement (tout est dans le diu de phy stat, un complément de la distribution canonique). Donner des ordres de grandeurs de vitesse quadratique moyenne et de libre parcours moyen, et même de temps de

diffusion pour faire 10cm par des OdG de marches aléatoires. On trouve la loi des GP, cool! Compressibilité isotherme, bien positive, ok! Mais on voudrait une approche plus thermodynamique.

2) *Définition, approche thermodynamique* : via les deux lois de Joule. Démonstration de l'équivalence des définitions (donc des lois de Joule avec l'équation d'état), en ne faisant le calcul que sur l'énergie interne via l'énergie libre⁹. Ce sera la même chose pour l'enthalpie. Implication réciproque prouvée de même, c'est un équivalence, on peut prendre la définition qu'on souhaite. On montre par Maxwell que les capacités calorifiques ne dépendent que de la température, d'où toute leur importance : elles décrivent la structure interne des particules du gaz qu'on étudie, cf la définition des gaz parfaits. Noter que la donnée de la capacité calorifique à volume constant définit entièrement un gaz parfait.

3) *Gaz parfait monoatomique et diatomique* : description adaptée? Oui! Blabla sur les capacités calorifiques, énergies internes, enthalpies, etc ... on a bien les structures internes, utiliser le théorème d'équipartition de l'énergie, ne pas se perdre longtemps sur les caractéristiques à basse température. On a bien compris notre modèle, et on sait bien décrire les gaz parfaits. Retour sur Mayer, ça marche, cool!

4) *Mélange idéal de gaz parfait* : en pratique, cf le cas de l'air, on a mélange de particules différentes. Mais le modèle marche toujours, puisque pas d'interaction. On aura juste des résultats plus compliqués pour les variables non fixées, comme la capacité calorifique.

5) *Entropie des gaz parfaits* : utiliser l'ITF qu'on intègre en utilisant l'équation des gaz parfaits. Noter un terme dû au 'désordre' en position, et un terme dû au 'désordre' en vitesse.

III) Étude des gaz réels

1) *Développement du Viriel* : première idée, faire un développement limité autour des gaz parfaits. Donner les développements possibles, dire qu'on peut faire des calculs exacts en physique statistique, mais que ça dépasse le cadre du cours. Température de Mariotte, lien avec le graphe présenté en début de leçon. Mais peu pratique à utiliser, et beaucoup de paramètres. On voudrait une équation d'état fermée.

2) *Équation d'état de VdW* : présentation heuristique avec l'introduction des deux coefficients. On a bien les caractères prédits dans les premières remarques sur les gaz réels. Noter l'apparition d'un point critique, mais mal décrit par VdW, il faut faire des modifs supplémentaires. Bonne description très générale des premières déviations au gaz parfait. Adimensionnement et théorème des états correspondants.

3) *Les détentes, un bon test des gaz* : détente de JGL, démo rapide du caractère iso-énergétique. Déviation : coefficient de JGL, lien avec le premier terme du développement du viriel, permet bien de tester le caractère parfait d'un gaz, et de quantifier sa déviation à celui-ci. Détente de JK, démo rapide du caractère isenthalpique. Coefficient de JK, on peut de même en quantifier la déviation au GP, application à la liquéfaction des gaz, température d'inversion de JK.

9. Bon, comme ce passage a manifestement stressé beaucoup de gens, voilà un petit topo du genre de calculs dont je parle : On va supposer que l'équation d'état des gaz parfaits est vérifiée. J'ai donc

$$PV = nRT \quad (1)$$

Je peux alors écrire l'identité thermodynamique fondamentale

$$dU = TdS - PdV \quad (2)$$

Qui n'est qu'en somme la définition thermodynamique de P et T . Différentiant S comme fonction de T et V , j'obtiens

$$dU = C_V dT + (l - P)dV \quad (3)$$

avec l'identification de C_V par sa définition même, et en ayant nommé de façon conventionnelle $l/T = (\partial S/\partial V)_T$. Écrivant alors la différentielle de l'énergie libre, j'ai

$$dF = -SdT - PdV \quad (4)$$

ce qui me donne par Schwarz que

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \quad (5)$$

Utilisant finalement l'équation des gaz parfaits, j'obtiens que $l = P$, puis par Schwarz que la capacité calorifique ne dépend que de la température. Par intégration à partir d'une température donnée, j'obtiens que l'énergie interne ne dépend que de la température! (en pratique, il faut tout faire en molaire, ou dire qu'on travail avec une mole -ce qui revient au même ...-).

LP11 : Premier principe de la thermodynamique

Bibliographie : Diu de thermo, Tout-en-un Dunod MPSI/PCSI Programme 2013

Niveau : CPGE MPSI

Pré-requis : systèmes thermo à l'équilibre, équations d'état (GP, PC), corps pur diphasé à l'équilibre, transfo thermo, énergie échangée au cours d'une transfo, mécanique MPSI

I) Énergie interne

1) *Énergie interne* : définition à partir de l'énergie totale et de l'énergie mécanique, à une constante additive près, $U(T,P,V,n)$ ¹⁰ fonction d'état, rappel fonction d'état, extensive et additive, topo additivité vs extensivité (extensivité, pour un système homogène, additivité pour deux systèmes a priori différents qu'on considère ensemble).

2) *Capacité thermique à V cste* : définition, rq sur dépendance en T, variation de U dans le CG et dans le cas où la capacité thermique est indépendante de T, extensive additive, molaire et massique

3) *GP mono-atomique et phase condensée* : RAPIDE (!), U et C pour le GP, indépendants de T, OdG, puis $U_m(T)$ pour les corps purs en phase condensée, explication, c_v , le plus souvent massique, OdG, eau (déf calorie), Dulong et Petit, capacité thermique indépendante de T en bonne approx.

II) Le premier Principe de la thermodynamique

1) *Premier Principe* : expression, NB système fermé et W/Q algébriques, rq U ou E fonctions d'état à l'équilibre¹¹, définition effective de Q via le premier principe, rq théorie des transferts thermiques en deuxième année qui nous permettra d'avoir Q autrement que par le premier principe, cas des systèmes isolés.

2) *Forme usuelle, cas particuliers* : $E_p = 0$ ou cste, expression, rq sur les différentielles totales ou les échanges élémentaires le long d'un chemin, et sur l'importance des notations. Cas où $E_c = 0$ ou cste et/ou iso-V, OdG pour chauffer de l'eau.

3) *Choix du système* : exemple sur gaz dans une enceinte avec une résistance chauffante à l'intérieur, trois systèmes, écriture du premier principe pour chaque système, application à mesure de capacité thermique (calorimétrie).

III) La fonction d'état enthalpie

1) *Enthalpie et capacité thermique à P cste* : définition, propriétés (les mêmes que pour U...), adapté à P=cste, de même pour la capacité, molaire/massique, propriétés.

2) *Premier principe pour une transfo monoP* : faire le calcul, utile pour mono-P, analogie avec U en iso-V.

3) *GP mono-atomique et phase condensée* : RAPIDE (!), pour corps pur en phase condensée approx $H_m(T)$, et les capacités à V et P constant à peu près égales.

4) *Système diphasé, enthalpie de changement d'état* : rapide, ne pas refaire le calcul explicitement, donner juste la définition et la formule en fonction des constitutions initiales et finales.

5) *Exemple d'application* : exo 24.8 du tout-en-un, poser précisément tout, faire bien proprement. Expliciter les Q différents, dépend du chemin suivi, H/U fonction d'état, différentielle totale, on peut passer par des transfo fictives. Une bonne façon de présenter l'exercice est de dire qu'on veut résoudre le cas irréversible (enfin, sans parler de réversibilité), et que pour cela on va introduire une transformation fictive, qu'on pourra quantifier. Tadaaaa!!!

Commentaire : un peu juste en temps, tracer pour bien faire l'exemple final, ne pas répéter 10 fois que H est mieux en mono-P ...

10. Il est important d'être conscient que le fait de pouvoir décrire un système par ces quelques variables seulement n'est absolument pas évident a priori. Par exemple en ce qui concerne la description par le volume seulement et pas la forme, cela requiert que le système soit homogène, et que les interactions de surfaces n'apportent que des contributions négligeables par rapport aux interactions de volume.

11. Noter que le fait de travailler avec des fonctions d'état à l'équilibre est lié à la nécessité de définir une grandeur intrinsèquement, comme c'est le cas pour tout les systèmes physiques. Une grandeur décrivant un état et n'étant pas fonction d'état à l'équilibre ne peut a priori pas avoir de sens physique. Sinon, une équation écrite dans un état d'équilibre deviendrait fausse après une transformation cyclique se ramenant au même état (a priori non distinguable physiquement du premier).

LP 12 : Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé

Bibliographie : Tout-en-un PC-PC*, Diu de thermo, BFR Thermodynamique (très bien!)

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Description d'un système thermodynamique, principes de la thermodynamique, principales fonctions d'état thermodynamique et leurs différentielles, mécanique classique

Remarque : attention, même si cette leçon peut sembler simple à première vue, elle présente un grand nombre de subtilités hautement non triviales, et de petites difficultés cachées, qui sont vraiment à repérer. Notamment le fait qu'un bilan seulement avec l'entropie de deux corps isolés en transfert thermique mais pas en travail des forces de pression foire, ou le fait qu'on ne sait pas vraiment comment prévoir simplement l'évolution spontanée d'un système thermo en évolution monotherme non isochore ou monobare.

Remarque : Bien insister sur le fait que le premier principe nous permet de quantifier le passage d'un état d'équilibre à un autre (les transformations thermodynamiques), et que le second principe nous donne des sens d'évolution spontanée, et donc a fortiori un état final d'équilibre (modulo toutes les crary de minima locaux qu'on peut avoir, cf la surfusion).

I) Évolution et équilibre d'un système isolé

1) *Application des principes* : on prend un système isolé, on a donc par les principes le fait que l'énergie interne est constante, et l'entropie créée, soit la variation totale d'entropie, est positive¹². Cela doit pouvoir nous permettre de trouver l'équilibre, et de donner le sens des variations.

2) *Équilibre thermique* : on a pour l'instant supposé que lorsque deux systèmes étaient en équilibre thermique, ils étaient à la même température (principe zéro de la thermodynamique), mais ça doit se démontrer. Ensemble de deux gaz isolés, séparés par une paroi fixe. Température différente. Montrer que c'est le corps chaud qui chauffe le froid. Évolution jusqu'à l'équilibre, c'est forcément l'état d'entropie max, on voit alors qu'on obtient équilibre des températures. (Noter que c'est forcément quasistatique pour qu'on puisse définir éq thermo sur chacun des sous-systèmes, mais échange entre les deux).

3) *Équilibre des pressions* : deux gaz isolés, séparés par une paroi, pression différente. Même raisonnement que précédemment pour la température. Par l'écriture différentielle de S, on montre que c'est le corps à la pression la plus élevée qui va gagner du volume, et équilibre à l'égalité des pressions. De même. Noter le concept de variables conjugués, et le fait que des couples seulement de variables peuvent communiquer alors qu'on laisse les autres inchangées.

4) *Systèmes non-isolés* : Ce qu'on a fait n'est pas mauvais, mais cette méthode ne marchera plus dès qu'on système ne sera plus isolé. Or, on aimerait bien aussi pouvoir récupérer un travail des systèmes thermo. Il va falloir utiliser d'autres fonctions thermodynamique. On va commencer par étudier le cas où le système est en contact avec un thermostat, avant de généraliser.

II) Système en contact avec un thermostat

1) *Présentation du problème* : système en contact avec un thermostat, écriture des principes

2) *Système monotherme et isochore, évolution et équilibre* : on voudrait isoler le terme en $S_{crée}$ pour se ramener à quelque chose que l'on connaît, en touillant, on arrive au potentiel énergie libre. Elle vérifie bien la même chose que ce que vérifiait l'entropie précédemment, elle est adaptée. Condition d'évolution et d'équilibre. Noter qu'à l'équilibre, elle est égale à l'énergie libre, donc qu'on peut rechercher les minima de cette dernière pour avoir l'équilibre. Application à un contact thermique avec un thermostat. Noter que c'est très proche du contact thermique du I), sauf qu'ici il y a un thermostat, et qu'on a introduit les outils adaptés. Lien avec l'énergie potentielle, mais sans trop insister, car je trouve ça un peu pourri. Cf la remarque introductive.

3) *Travail récupérable* : si je veux récupérer du travail, je peux écrire les principes sur la transformation, blablabla (noter qu'on ne peut pas faire de parallèle propre avec le I) ici, car le système était isolé). Identification du potentiel énergie libre avec le travail maximal récupérable, noter qu'on n'a pas précisé que ce travail était forcément des forces de pression. Égalité lors de la transformation réversible. Faire un exemple. Lien avec énergie potentielle, je peux récupérer de l'énergie en faisant descendre une masse,

12. c'est d'ailleurs l'occasion de faire remarquer qu'une paroi athermane, et donc qui empêche deux système d'échanger du transfert thermique, les empêche aussi d'échanger de l'entropie ...

je dois en fournir pour la faire monter. Noter que la réversibilité n'est pas techniquement souhaitable, cf machines thermiques.

III) Potentiels thermodynamiques

1) *Définition* : définition très générale, cas adiabatique, monoT et isoV. Lien avec le travail récupérable, attention sur le isoV, ce n'est pas forcément le cas quand je récupère du travail, à bien nuancer !

2) *Évolution monotherme et monobare* : méthode systématique, potentiel enthalpie libre, évolution et équilibre, minima de G^* et de G , travail maximum récupérable (attention, sauf des forces de pression).

3) *Généralisation* : faire isotherme et isochore, et isotherme et isobare, rien à dire, juste que les potentiels s'assimilent aux fonctions thermodynamiques. Faire un joli tableau comme dans le tout-en-un. De manière générale, il faudra le chercher soi-même en faisant apparaître $S_{créée}$ comme fonction du reste, et les méthodes seront très générales. Parler des minima locaux qui peuvent exister, type surfusion, et du fait qu'ils ne sont stables que si ils ont un gap pour en sortir bien plus grand que l'énergie d'agitation thermique, les grandes fluctuations ayant des probabilités qui décroissent en exponentielles décroissantes.

4) *Application* : équilibre d'une bulle de savon dans l'atmosphère : cf le complément du Diu, ok.

Commentaire : Il semble souvent intuitif pour qui a fait un peu de thermodynamique que lors d'un processus adiabatique (sans transfert thermique) et quasi-statique, la variation d'entropie sera d'ordre 2 au moins en les perturbations extérieures, ce qui permettra d'avoir une limite réversible. En fait, ce résultat est démontrable de manière assez rapide. Dans ce genre de situations, on peut paramétrer les actions extérieures par un ensemble de paramètres X_i . Ceux-ci peuvent décrire la pression, le volume, le champ électrique, etc... Se restreignant au cas d'un seul paramètre, et supposant que dX/dt est suffisamment petit (soit que les conditions extérieures varient d'une manière suffisamment lente pour qu'on puisse considérer à tout moment que le corps se trouve à l'état d'équilibre, d'où le lien avec la définition précise d'une transformation réversible), on peut alors faire un développement limité de S en fonction de dX/dt . Or, le terme d'ordre 0 doit être nul, puisque le système subissant une transformation adiabatique et partant d'un état d'équilibre initial, l'entropie est inchangée si on ne change pas les paramètres extérieurs. Ensuite, le terme d'ordre 1 doit être nul, car l'entropie du système considéré ne peut qu'augmenter lors d'une transformation adiabatique. Le développement de dS/dt commence donc bien par des termes du second ordre en dX/dt , ce qu'il fallait démontrer.

LP 13 : Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques

Bibliographie : Dunod Tout-en-un MPSI/PTSI, prendre l'ancien et le nouveau programme, Diu de thermodynamique.

Niveau : MPSI

Pré-requis : Transfo thermodynamique, Énergie échangée au cours d'une transfo, premier principe de la thermodynamique, deuxième principe de la thermodynamique, corps pur diphasé à l'équilibre

I) Généralités sur les machines thermiques

1) *Définition* : ce qu'on considère comme une machine thermique, approche historique, cycle, représentation par un travail avec l'ext et des échanges avec des thermostats, représentation idéale.

2) *Application des principes de la thermodynamique* : deux principes sur le cycle, réversibilité et inégalité de Clausius.

3) *Moteur monothermes* : impossibilité. De même, pas de cycle purement thermique. Il va donc falloir travailler avec au moins deux thermostats.

II) Machines thermiques dithermes

1) *Différentes machines thermiques* : Diagramme de Raveau, explication, tracé, zone utiles. But des différentes machines thermiques : moteur, frigo, pompe à chaleur.

2) *Efficacité* : définir proprement, différencier efficacité réelle vs réversible. Calcul d'une efficacité réversible, généralisation aux deux autres. Ça ne dépend que des T ! OdG.

3) *Théorèmes de Carnot* : deux théorèmes, exprimés proprement. *La réversibilité n'est pas techniquement souhaitable !* (car la puissance tend vers 0, cette dernière phrase est fondamentale, et à bien méditer!).

III) Cycles monophasés

1) *Généralité sur les cycles monophasés* : forcément mono-T/adiab/mono-T/adiab (et oui!), Représentation en P/V ou S/T. Lien entre la surface en P/V et le travail.

2) *Cas réversible, cycle de Carnot* : présentation (en pratique si on veut une transformation monophasée réversible, on a pas le choix, cf le 1), c'est très fort!), rendement, égal à théorique, normal, lien avec les théorèmes de Carnot.

3) *Cycle réel* : explication des cycles réels d'un moteur, présentation sur transparent, et sur moteur de Fauvarque. Calcul et OdG de rendement. Rapide!

IV) Échange avec des systèmes de température variable

1) *Modélisation* : on a toujours pris des thermostats, mais ce n'est pas toujours le cas. Pe frigo qui démarre, ou climatiseur qui se met en route. On peut donc modéliser ces systèmes en prenant en compte leur capacité calorifique et leur changement de température.

2) *Méthode de résolution* : on va faire ici le plus simpliste possible : on suppose que la machine fonctionne avec des cycles infinitésimaux réversibles sur lesquels on va pouvoir faire supposer les températures constantes. On pourra alors résoudre le problème par intégration en explicitant proprement le problème, et notamment en reliant les transferts thermiques aux variations de température des sources dont on connaît la capacité thermique.

3) *Mise en route d'un climatiseur* : Pour une pièce de capacité connue, pour passer la pièce de 35 degré (température extérieure) à 20 degré en une heure, quelle est la puissance minimale nécessaire ?

*4) *Moteur fonctionnant entre deux sources variables* : alternative possible si le climatiseur ne plaît pas, mais je le trouve moins sympa, et le climatiseur permet de varier un peu.

Commentaire : Être efficace et rapide au début. Ne pas se perdre dans la partie III. Au pire, des parties sont éjectables sans problème. Il est aussi envisageable d'étudier des cycles diphasés. L'étude des réfrigérateurs par le diagramme des frigoriste est aussi au nouveau programme de Sup, et peut être très intéressante.

LP 14 : Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases

Bibliographie : Diu de thermodynamique, Tout-en-un PC-PC*, etc ...

Niveau : CPGE 2ème année, PC

Pré-requis : Principes de la thermodynamique, potentiels thermodynamique, conditions et évolutions d'équilibre, étude expérimentale des changements d'états : nomenclatures, caractéristiques des différents paliers, diagrammes PV et diagrammes PT

Remarque : On supposera, conformément à ce que semble dire le titre de la leçon et le rapport du jury que l'étude expérimentale des changements d'état est déjà connue. On ne perdra donc pas de temps à faire des rappels qui seraient soit trop longs, soit trop concis et donc inutiles

I) Cadre de l'étude, utilisation de l'enthalpie libre

1) *Présentation du problème* : on prend un corps pur diphasé, on veut étudier l'évolution et les conditions d'équilibre. On suppose que le système est fermé, et on notera le système par les quantités de matières ou les masses, et/ou les fractions molaires ou massiques. On supposera qu'il y a équilibre mutuel, à savoir égalité des températures et des pressions. On note alors qu'on a toujours équilibre thermique et mécanique, et qu'on s'intéresse en fait à l'échange de matière (en fait, le passage d'une phase à l'autre d'une certaine quantité de matière).

2) *Enthalpie libre* : on est en isoP et isoT, on peut redémontrer rapidement que l'enthalpie libre ne fait que diminuer, et est minimum à l'équilibre. On peut alors utiliser l'extensivité de l'enthalpie pour écrire avec les fractions molaires et les entropies molaires. On a trois cas, soit évolutions vers une des deux phases, soit équilibre. On a alors égalité des enthalpies molaires. On note que l'enthalpie molaire s'assimile ici au potentiel chimique, donc même chose en chimie même si nom différent, c'est plus adapté en fait au mélange d'espèces chimiques différentes.

3) *Continuité des grandeurs à la transition* : on a des grandeurs continues et discontinues. On a déjà vu que l'enthalpie libre et donc le potentiel chimique étaient continus. On se restreindra aux transitions de premier ordre, on verra que c'est ce qu'on observe en pratique. On a discontinuité du volume molaire, et de l'entropie molaire (attention, on a quand même continuité du tout lors de l'évolution). On peut d'ailleurs expliquer à partir des courbes de G en DL proche de la transition que la phase de basse température est celle d'entropie faible, et celle de basse pression est celle dont le volume est le plus grand (retour sur la glace qui fond quand on appuie dessus). Faire un petit graphe clair du DL peut ici beaucoup clarifier les interprétations physiques.

4) *Chaleur latente de transition* : définie par différence entre les enthalpies molaires. Comme le volume molaire est discontinu à la transition, l'enthalpie est forcément aussi discontinue. C'est bien ce qu'on observe, donc le fait de prendre une transition du premier ordre était bien cohérente. Démo pour avoir le lien avec l'entropie de changement de phase, on note qu'on retrouve bien le fait que l'enthalpie de changement d'état et l'entropie de changement d'état sont toujours positives quand on passe de la phase de basse température à celle de haute température, ce qui est ce qu'on observe physiquement.

II) Étude du diagramme de phase (P,T)

1) *Diagramme de phase* : on s'intéressera aux cas simples, qu'on essayera d'expliquer. Petits rappels sur la nomenclature, présentation de celui de l'eau et du dioxyde de carbone.

2) *Formule de Clapeyron* : démo, bien rappeler qu'on reste sur la courbe de coexistence, d'où le terme de dP_{eq}/dT . Noter sa double utilisation : on peut retrouver la chaleur latente si on a des points sur la courbe, ou bien obtenir l'équation de la courbe si on a la chaleur latente.

3) *Équilibre liquide/solide* : volumes molaires très proches, donc pente très élevée, cas de l'eau ou le volume molaire de la glace est plus élevé que celui de l'eau liquide, donc pente négative, cas général. Intégration de l'équation en supposant les paramètres indépendants de la température, à partir d'un point quelconque.

4) *Équilibre liquide/vapeur* : près du point critique, chaleur latente qui tend vers 0, et sa dérivée qui tend vers l'infini, transition de phase du second ordre. Loin du point critique, intégration de la courbe en supposant les paramètres indépendants de la température.

III) Étude du diagramme de Clapeyron (P,V)

1) *Diagramme de Clapeyron* : présentation rapide, déterminée expérimentalement par des isothermes, nomenclature, point critique, etc ... Lien entre les deux diagrammes par des petits tracés d'isoT (par exemple). Ici ça va être un peu technique, donc on ne fera pas tous les calculs, mais on montrera au moins graphiquement la forme des résultats (parce que calculer les isoT de VdW ...).

2) *Étude par le potentiel enthalpie libre* : on suppose celui-ci connu, donner l'exemple de VdW pour la transition liquide/vapeur, cas des solides, condition de coexistence de phase. Applications : états métastable, tracé d'une isotherme dans Clapeyron, on retrouve bien les courbes expérimentales.

3) *Tracé d'une isoT* : on part d'une équation d'état, pe VdW, et on trace une isotherme. Au dessus de T_c , ça va, au dessous, on a des problèmes, car on ne vérifie plus les lois de modérations. Il va falloir modifier les courbes, paliers déjà étudiés, on prend deux points de même enthalpie libre, ok. Lien avec le petit 2 : en fait c'est la même chose, mais exprimé différemment.

LP 15 : Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique

Bibliographie : Diu de fisthat, BFR de Thermodynamique

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique et thermodynamique classique. Description microcanonique d'un système thermodynamique

Remarque : Il peut être intéressant dans le cadre de cette leçon de noter que l'entropie est ... anthropique. En effet, le dénombrement des micro-états dépend de la description qu'on a des systèmes! C'est à méditer longuement. En effet, je peux étudier un gaz sans prendre en compte la structure interne des particules, ou en la prenant en compte, et l'entropie ne sera pas la même. Le modèle physique sera équivalent si toutes les particules sont identiques, avec simplement une factorisation, mais il faut techniquement garder celle-ci en tête. Cependant, si nous n'avons pas une description propre et cohérente de la physique complète du problème, nous passons sous silence des micro-états, a priori non négligeable dans la description de la physique. Et comme on descend rarement jusqu'à la structure la plus intime des particules, et bien c'est presque tout le temps le cas, car nous n'avons même pas forcément les capacités nécessaires pour décrire la structure complète du problème! Un exemple de tel effet est le caractère quantique qui est laissé de côté dans les études classiques, mais qu'il est souvent nécessaire de prendre en compte quand la température descend trop (ce qui signifie souvent qu'on ne peut plus utiliser le théorème d'équipartition de l'énergie), et qui peut donner un résultat faux en cas d'oubli! L'entropie dépend donc de la façon qu'on a de décrire le système, et c'est très fort! Noter que d'un point de vue thermodynamique macroscopique via les principes, l'entropie est normalement définie de façon absolue et intrinsèque, même si cela n'aide pas forcément à la décrire.

I) Description canonique d'un système en contact avec un thermostat

1) *Système canonique* : on a travaillé pour l'instant avec E fixée, mais ce n'est pas très pratique pour décrire une situation réelle. On va donc supposer que E peut varier. Mais pour cela, le système doit échanger de l'énergie avec un autre système. Afin de pouvoir résoudre le problème, il va échanger avec un thermostat. Notion classique de thermostat. Ici il va changer d'énergie, car pour pouvoir faire du microcanonique sur le tout, il faut que l'énergie totale soit fixée. Donc un peu différent. Définition de la température microcanonique, DL, approximation du thermostat, ok. Ensuite, si l'équilibre thermique, la température est invariante, et égale à celle du thermostat, ok!

2) *Probabilité d'un état microscopique* : On applique le postulat microcanonique au tout, on obtient après quelques menues considérations physiques la probabilité canonique. Définition de Z . Sens physique de Z : pas très clair, on verra après. Lien avec tout ce qu'on a fait en physique classique, atmosphère isotherme, suspension de colloïdes, interaction magnétique, etc ... Bon pour tous les systèmes, tant qu'il y a thermostat, on préférera couplage faible pour les systèmes microscopiques, pour qu'ils restent bien à l'équilibre. Valeur moyenne d'une observable sur la somme des états. Mais comme on a souvent une dépendance seulement en l'énergie, il serait plus simple d'utiliser :

3) *Probabilité d'une énergie donnée* : il suffit d'additionner, on voit alors apparaître la dégénérescence en énergie. Il faut noter que de manière générale, même si la probabilité est en exponentielle décroissance de l'énergie, la dégénérescence augmente aussi beaucoup avec l'énergie, et donc l'état le plus probable n'est pas forcément celui de plus faible en énergie. Échelle caractéristique de température $k_B T$, signification physique. Passage à l'approximation continue.

4) *Répartition des vitesses dans un gaz* : travailler pour une seule particule, et dire qu'on prend des particules indépendantes (en fait un GP monoatomique). Décomposition, pour une composante, pour la norme, dire qu'on aurait pu faire l'énergie mais que c'est pareil, etc ... Faire des jolis graphes de distribution, montrer tout ce qu'on a dit plus haut. Mais ... ça ressemble toujours à la même chose, non ?

5) *L'approximation gaussienne* : expliquer proprement, aller vite, faire un joli DL. (Évoquer le 'theorem central limite', ainsi que son manque de nom en français, mais y aller doucement). Parler de l'écart en racine de N , évoquer les marches aléatoires, et les grandes fluctuations en exponentielles.

II) Fonctions thermodynamiques de l'ensemble canonique

1) *Fonction de partition et énergie libre* : dans l'ensemble microcanonique, on pouvait tout avoir à partir de la donnée de l'entropie, ici ce rôle va être joué par la fonction de partition, ou plus particulièrement par son logarithme, qui est l'énergie libre. Définitions, dire a priori de quoi il va dépendre. Exemple d'un gaz, mais aussi d'un milieu magnétique. Extensivité.

2) *Calculs des fonctions thermodynamiques* : à partir de l'énergie libre, on peut tout avoir. Petit calcul rapide du lien entre les dérivées par rapport à β et à T , calcul de l'énergie, de l'entropie, de la capacité calorifique, de la pression et du potentiel chimique. Extensivité.

3) *Cas d'un milieu magnétique* : montrer rapidement qu'on peut obtenir les mêmes types de résultats. Donc pas valable seulement pour les systèmes thermo « classiques », mais tout à fait généralisable à plein d'études diverses et variées, ainsi que ludiques et récréatives

4) *Notion de limite thermodynamique* : limite où la gaussienne de la partie précédente est suffisamment piquée pour qu'on puisse bien approximer l'observable à sa valeur moyenne, qui sera donc ici sa valeur à l'énergie moyenne (sous réserve de ...), calcul par un petit DL de type gaussienne.

5) *Équivalence des ensembles* : on retrouve bien l'équivalence des ensembles canonique et microcanonique, ce qui est rassurant, car les lois de la physique doivent être les mêmes quelle que soit l'approche qu'on utilise (ainsi que le référentiel!!).

6) **Méthode de Monte-Carlo* : soit ici, soit plutôt vers la fin, mais trouver un endroit où le mettre, méthode de Monte-Carlo appliquée à la physique statistique, par exemple avec l'algorithme de Métropolis. Cela peut paraître éloigné d'un cours de base, mais le concept global est en fait très élémentaire : on a un ensemble d'états possibles qui peut être calculé explicitement, mais qui demanderait pour cela beaucoup trop de temps de calcul. On veut donc ne sélectionner qu'un sous-ensemble d'états représentatif de la physique qu'on aurait en faisant tout le calcul, et qui simplifiera donc le problème considérablement. Utilisation d'une sorte de marche aléatoire dont la probabilité de faire un pas d'un état à un autre dépend du facteur de Boltzmann de l'énergie entre les deux états, etc ... Enfin, ce n'est qu'une proposition.

III) Le gaz parfait monoatomique

1) *Le gaz parfait* : résultat de thermo classique, on doit pouvoir les retrouver. Définition propre d'un GP, hamiltonien.

2) *Ensemble de particules indépendantes* : séparer le cas discernable de non discernable, dire le résultat qu'on va avoir dans chaque cas. Comme c'est un point qui est souvent très peu clair, il peut être très utile de faire de petits dénombrements pour des nombres réduits de particules. Ici, nos particules seront indiscernables.

3) *Fonction de partition et énergie libre* : calcul, le choix peut être fait de ne pas prendre en compte le spin et de le passer sous le tapis sous nécessaire, cela fait cependant un bon exemple de rajout de ce qu'il faut dénombrer ou pas.

4) *Autres fonctions thermodynamiques* : énergie, capacité calorifique, pression, potentiel chimique. Le potentiel chimique permet d'ouvrir sur la description grand canonique.

LP 16 : Rayonnement d'équilibre. Corps noir

Bibliographie : Diu, Diu, Tout-en-un MP-MP*, Tec&Doc MP/MP*

Niveau : CPGE MP

Pré-requis : Thermodynamique, électromagnétisme, conduction thermique et bilans thermiques

Introduction : expérience introductive de la lampe à filament relié à un transfo de puissance, qu'on alimente de plus en plus. Le filament étant chauffé de plus en plus, et donc de plus en plus chaud (on y reviendra), il émet de plus en plus intensément, et son spectre est décalé progressivement vers le visible.

I) Rayonnement et bilan radiatif

1) *Différents aspects du rayonnement* : aspect ondulatoire, onde électromagnétique de fréquence donnée, qui va à c dans le vide, densité volumique dans le vide par formule d'électromag, et densité de flux électromagnétique. Aspect corpusculaire ; photons de masse nulle, à c , formule de l'énergie et de l'impulsion, densité volumique de photons. Lien entre les deux représentations. En pratique elles sont équivalentes

2) *Émission et absorption thermique* : on se restreindra à celles-ci. Dû au rayonnement d'accélération des charges, continuum de fréquences, puissance radiative augmente avec la température, refroidit la matière et donc cause une perte d'énergie. Absorption par le processus inverse, mise en mouvement désordonnée des charges qui crée de l'agitation thermique, à toutes les fréquences, dépend de la fréquence, et chauffe la matière, donc causant un gain d'énergie. On voit qu'il y a des échanges d'énergie par les émissions absorptions thermiques, on peut donc faire des bilans !

3) *Bilans radiatifs* : absorption et réflexion (diffuse et spéculaire). Définitions des flux incidents et partants, ainsi que absorbé, émis, et réfléchi. Lien entre tous ceux-ci. Définition des coefficients d'absorption et de réflexion, ils dépendent a priori de la longueur d'onde (on a intégré sur toutes les directions). Définition ici de corps noir, gris, blanc. Flux thermique à une interface, parler de son signe. Définition de solide opaque et transparent (dépend de la longueur d'onde !)

II) Rayonnement d'équilibre

1) *Définition* : on prend un gaz dans une cavité d'un solide opaque à température fixée T . Au bout d'un temps donné, on a équilibre entre la paroi et l'intérieur. Aspect corpusculaire : gaz de photon à l'équilibre thermique avec la paroi, comme le ferait un vrai gaz avec des adsorptions/ré-émission. Aspect ondulatoire : champ électromagnétique dans la sphère, avec absorption et émission permanente avec la paroi. Ici la paroi joue le rôle de thermostat, et on va commencer par étudier le rayonnement d'équilibre à la température T , comme on étudierait un gaz parfait à la température T .

2) *Densité spectrale d'énergie* : Procédure de calcul, via physique statistique. Pour commencer, le dénombrement des modes avec les ondes planes. Puis on intègre pour chaque mode. On n'obtient pas le bon résultat, (mixer avec l'approche historique). Quantification, ça marche. Avancement important, on a quantifié le champ électromagnétique, ce qui peut sembler absurde à première vue ! Historique, lois de Wien et de Rayleigh-Jeans, problèmes, notamment la catastrophe ultraviolette, problème résolu en 1900 par Planck, il a dû pour cela introduire une constante d'aide, qui nécessite de quantifier les niveaux d'énergie, et qui sera un des points de départ du développement de la mécanique quantique. Nous ne nous y attarderons pas, ces développements seront faits dans des cours de niveau supérieur. Remarquer l'apparition des différentes constantes fondamentales dans chacune des formules, en lien avec les différentes théories utilisées.

3) *Propriétés des rayonnement d'équilibre* : écriture en longueur d'onde, forme de la courbe, décalage, loi du déplacement de Wien, OdG, domaine contenant la partie la plus importante de l'énergie.

4) *Flux surfacique, loi de Stefan* : lien entre la densité volumique et le flux surfacique, intégration du résultat sur toutes les longueurs d'onde et loi de Stefan. Retour sur la lampe, on a bien un spectre qui ressemble à la loi de Planck, et une grande augmentation de l'intensité, mais on n'a pas relié ça à l'émission des corps.

III) Corps noir, émission thermique

1) *Corps noir* : définition, on l'a déjà donné, on la rappelle, et on dit ce que ça signifie. Réalisation, approchée, exacte par l'exemple du four.

2) *Émission du corps noir* : on est à l'équilibre, donc on a le flux surfacique qui est nul, ok, émission comme flux surfacique, en pratique c'est normal pour avoir équilibre thermique. On comprend aussi le sens de rayonnement d'équilibre via le rayonnement des corps à l'équilibre avec le rayonnement.

3) *Généralisation de la loi d'émission* : cas d'ETL, on suppose qu'on a par petite surface une émission à la température de celle-ci. On suppose aussi valable pour les phénomènes proches d'équilibres (on aura toujours des petites déviations, mais ok à l'ordre 1). Retour sur l'expérience du filament qui chauffe, bilan d'énergie et évolution jusqu'à atteindre l'équilibre entre l'énergie émise par radiation, et l'énergie électrique reçue par effet Joule, l'augmentation de la température du filament ayant lieu tant que le différentiel n'est pas nul.

4) *Application au soleil* : flux surfacique à la surface, on suppose corps noir, blablabla, température de surface, ok. On note qu'en pratique on n'est pas vraiment à l'équilibre. Ouverture sur le CMB. Température fonction du rayon au centre du soleil. On suppose transfert seulement radiatif, absorption/émission, on arrive à une courbe de température, on regarde le rayon qu'on obtient pour le noyau en fusion, comparaison aux vraies valeurs. Bien noter que ce ne sont que des toys modèles. Attention, pas si trivial que ça, à reprendre. Sinon équilibre thermique de la terre, ou autre crary.

IV) Émission de corps non noirs

1) *Émissivité* : définition, dire que ça dépend de la longueur d'onde. Flux rayonné, cas où l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde, loi de Stefan modifiée.

2) *Loi de Kirchhoff* : bilan à l'équilibre thermodynamique, on voit que l'absorption est égale à l'émissivité à une longueur d'onde donnée. Très fort ! On voit que les corps noirs sont ceux qui émettent le plus à une température donnée. Application : vase Dewar, transformateur électrique (noir pour émettre le plus possible).

LP 17 : Phénomènes de Transport

Bibliographie : tout-en-un PC/PC* ou PSI/PSI*, Diu de Thermodynamique (très propre, à checker pour TOUTES les définitions), Feynman électromagnétisme 1, BFR de Thermodynamique

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : électrocinétique, électrostatique, thermodynamique de sup, cours sur les flux et les bilans

Remarque : on se focalisera sur transport thermique, mais transport de matière très proche, on fera des parallèles quand ce sera nécessaire

I) Lois du transport thermique

1) *Types de transport* : diffusion, convection, rayonnement (donner des définitions propres!), cas des solides et milieux transparents, importances relatives, convection forcée vs naturelle, on supposera par la suite rayonnement thermique négligeable, un chapitre y sera consacré.

2) *Équilibre thermodynamique local* : Thermodynamique légèrement hors-équilibre car il y a des flux, notion d'ETL qui permet de travailler et de définir les grandeurs. Pas de convection pour suivre le programme, donc par la suite équilibre macroscopique.

3) *Loi de Fourier* : expression, date, unité et signe de conductivité, phénoménologique, irréversibilité, dépendance en T, limites de validité, OdG, parallèle avec Fick, historique (Fick s'inspire de Fourier, car phénomène très similaire).

4) *Équation de bilan thermique* : OS ρ , λ , c_v homogène ind de T, loi de conservation, explicitation des termes, schéma, équation de la chaleur, historique (série de Fourier), décompte des inconnues, équation sur n (rapide), cas sources nulles ou RP (partie II et III).

5) *Analyse microscopique* : à faire PROPREMENT, bien choisir ses mots, exemple sur Fick, cf le BFR.

II) Diffusion

1) *Équation de diffusion* : cas thermique, généralisation, ex de l'effet de peau ou de la diffusion de quantité de mouvement en hydro, phénomène irréversible ($dt \rightarrow -dt$, contenue dans Fourier), lent /r à convection

2) *Exemple sur diffusion 1D* : On chauffe très fort et très vite en un point (pe avec flamme), comment va évoluer le profil de température. Solution pe dans le tout-en-un dans le chapitre diffusion de particules, ou bien BFR. Tracé, largeur à mi-hauteur (rajouter la température du corps).

3) *Temps et longueurs caractéristiques* : raisonner avec OdG, caractéristique générale, exemple de sucre dans café.

III) Étude du régime permanent

1) *Équations du RP* : cas avec source, électrostatique, cas sans sources, conservation du flux, électrocinétique.

2) *Cas sans source, électrocinétique* : Barre de fer avec deux thermostats, schématisation 1d, flux constant, profil de T. Lien avec conduction électrique et conservation de la charge, T donne V et flux donne intensité.

3) *Résistance thermique* : introduction très générale, 1D + effets de bords négligés, association série, exemple sur une fenêtre avec air.

4) *Cas avec source, analogie électrostatique* : calcul du champ de température et de \vec{j}_Q au dessus d'un point chaud, dans le Feynman à la partie analogie électrostatique, compléter proprement les conditions aux limite, résoudre, considérations physiques, OdG (pe une puissance donnée à 10 km de la surface, température en surface, sources chaudes), fascination devant la puissance de la méthode

Conclusion : Lois très générales, irréversibilité, mêmes équations donnent même physique, OdG peuvent être différents

Commentaire : Attention à donner des définitions très propres (Diu), et à utiliser un vocabulaire très précis. Essayer de laisser un peu de temps pour le dernier exemple, méditer sur ce qu'on zappe en cas de problème de timing

LP 18 : Flux conductifs, convectifs, radiatifs, bilans thermiques

Bibliographie : tout-en-un MP/MP* Dunod, Diu de Thermodynamique, BFR de Thermodynamique
Niveau : CPGE MP

Pré-requis : Conduction thermique (Fourier, j de conduction, ...), rayonnement thermique (travail sur les flux, Planck, Stefan, ...)

Introduction : on a étudié les flux dus à la conduction et au rayonnement thermique, maintenant on va voir comment prendre tout cela en compte a priori en même temps et faire des bilans thermiques.

I) Les transferts thermiques

1) *Conditions de l'étude* : ETL, définition permise des variables intensives.

2) *Les trois modes de transfert thermique* : définition propre des trois modes (se fier au Diu!), mettre en rapport avec les cours précédents, donner des exemples, dire que ce qui existe dans le vide, fluide opaque/transparent, solide opaque/transparent. Il peut être intéressant de faire ces rappels sur transparent, car écrire les définitions proprement au tableau prend du temps, et ces notions sont supposées déjà connues. Cela permet un compromis sympathique, car ne pas faire ces rappels serait quand même très mal vu à mon avis.

3) *Transfert conducto-convectif* : explication propre avec les couches limites, loi de Newton, phénoménologique, OdG. En rapport avec l'hydrodynamique et la taille caractéristique de la couche limite, on peut voir que le coefficient de transfert convecto-conductif est en \sqrt{v} , ce qui est un résultat intéressant.

II) Flux et bilans thermiques

1) *Les flux thermiques* : introduction par principes de la thermo avec H en iso-P, décomposition en jusqu'à trois composante, calcul de chacune, flux total. Rq sur le fait qu'on a parfois les flux et parfois les vecteurs densité de courant, avec utilisation couplée.

2) *Bilan thermique* : introduire tout très proprement. Le Diu fait les choses beaucoup mieux et le tout-en-un, expliciter bien chaque terme. Passage du macroscopique au microscopique.

3) *Bilan thermique en symétrie sphérique* : faire le calcul proprement (!), revient à utiliser des divergences et/ou des laplaciens en sphérique, mais pas besoin de formule. Application à un soleil, régime transitoire, puis permanent, avec une surface dans et hors du soleil. OdG, masse dissipée par le soleil par udt.

4) *Continuité du flux thermique* : raisonnement sur boîte élémentaire, toujours valide, noter que par contre les dérivées de T peuvent être discontinues.

III) Application au régime permanent

1) *Équations du régime permanent* : Équations. Cas sans source, conservation du flux. Cas avec source, interprétation physique. Lien avec électrocinétique, montrer les similitudes, V et T, I et Phi.

2) *Résistance thermique* : commencer par faire le calcul avec un modèle 1d proprement, puis faire l'analogie. De même pour conducto-convectif. Montrer qu'on peut les associer en série ou en parallèle.

3) *Application* : Isolation d'une maison, mur, mur avec isolant, ou fenêtre, au choix.

Commentaire : Utiliser proprement l'exemple du soleil, très riche, pour bien faire passer les bilans thermiques.

LP 19 : Conversion de puissance électromécanique

Bibliographie : Tout-en-un PSI-PSI*, Hprépa électronique II PSI-PSI* (le vert), BUP « moteurs électriques » qui récapitule bien tout et donne plein d'informations intéressantes !

Niveau : CPGE PSI

Pré-requis : Mécanique, électromagnétisme, électronique

I) Conversion électromécanique de puissance, généralités

1) *Phénomènes en jeu* : Force de Laplace, c'est bien cette force qui permettra un couplage entre mécanique et électricité, puisqu'elle contient un terme de chaque domaine ; elle est indispensable dans cette conversion ! Induction : en pratique, ici on sera toujours dans le cas de Lorentz, puisqu'il y aura des déplacements, le cas de Neumann est adapté à la conversion électrique/électrique. Rappel du champ électromoteur, on voit apparaître encore une fois encore une fois le couplage électrique/mécanique, loi de Faraday.

2) *Conversion mécanique/électrique* : force extérieure, déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique. On a alors une fem induite, exemple simple d'un fil relié à une charge, dénombrement des différentes puissances, et le magnifique dessin du Hprépa.

3) *Conversion électrique/mécanique* : conducteur parcouru par un courant, dans un champ, force de Laplace, exemple simple du fil, dénombrement des différentes puissance, magnifique dessin du Hprépa.

4) *Propriétés d'une induction à champ constant* : blablabla, conversion parfaite. Faire attention à bien donner les termes égaux.

II) Moteurs et alternateurs, généralités

1) *Utilisation de la conversion de puissance* : partout, tout le temps, monde moderne repose sur cette maîtrise. Transducteur, moteur, alternateur, utilisation partout, autres exemples aussi, comme les haut-parleurs, etc ... On va étudier ici les moteurs et alternateurs.

2) *Stator, rotor* : définition générale, réalisation. Stator, champ B statique, aimant ou bobine ; champ B mobile, bobines. Rotor, de moment magnétique constant, aimant ou alimentation extérieure, ou non constant, alimenté par effets inductifs du champ du stator, nécessite alors un champ B mobile du stator.

3) *Différents moteurs* : présentation globale, avec les mains, cf le BUP, dénombrement rapide des avantages et inconvénients, exemple d'évolution technologique par le TGV qui a utilisé les trois. Lien avec le progrès de l'électrotechnique.

III) Machine à courant continu

1) *Présentation* : faire des schémas les plus simples possibles, et très épurés, forme du champ magnétique, collecteurs et balais.

2) *Fem induite* : on suppose fonctionnement en mode alternateur, à vitesse de rotation fixée, calcul rapide, intérêt des collecteurs qui servent de redresseurs, fem induite.

3) *Couple électromagnétique* : calcul propre, couple constant, bilan de puissance, on retrouve bien la conversion de puissance.

4) *Bilan de puissance* : on explique que c'est réversible, bilan de puissance dans les deux cas, rendement, retour sur les petits dessins fait en I).

5) *Réalisation technologique, et utilisation* : ne pas se perdre, être clair et précis, aller vite, ne pas trop raconter sa vie.

IV) Machine à champ tournant

1) *Présentation* : faire des schémas les plus simples possibles, et très épurés, réalisation du champ tournant par trois bobines et alimentation triphasée.

2) *Moment magnétique dans un champ tournant* : blablabla, calcul.

3) *Fonctionnement moteur* : blablabla, partie stable et instable, ne peut pas démarrer seul. On pourrait de même le faire fonctionner en alternateur. Utilisation technologique.

4) *Moteur asynchrone* : explication rapide, couple fonction de la fréquence de rotation, zone stable, zone instable, démarrage. Utilisation technologique.

Commentaire : bien avoir en tête et préciser que l'évolution des moteurs ces dernières années est aussi et surtout due à l'évolution de l'électrotechnique. Bien être conscient que c'est horriblement short niveau temps, les deux premières parties doivent être réalisées en maximum 20 minutes ; s'inspirer de Lev Davidovich.

LP 20 : Induction électromagnétique

Bibliographie : BFR d'électromagnétisme 3, Tout-en-un MPSI/PCSI nouveau programme, Tout-en-un 2ème année ancien programme, BUP « chute freinée » on regarde les références

Niveau : PTSI

Pré-requis : Mécanique, étude du champ magnétique, force de Laplace

Introduction : expériences qualitatives, on joue avec un aimant et une spire

I) Lois de l'induction

1) *Le phénomène d'induction électromagnétique* : présentation, séparation en deux cas différents, mais on pourrait avoir les deux en même temps. Parler déjà du changement de référentiel, mais dire que c'est plus souvent plus pratique de se placer dans un des deux cas. Préciser l'importance de l'induction, elle permet des conversions de puissances, électrique/électrique ou mécanique/électrique : l'ensemble du développement électrique de la civilisation moderne repose sur ce paramètre !

2) *Loi de Faraday* : l'énoncer proprement, bien dire que c'est le flux de tous les champs qu'il faut mettre dedans, y compris celui du circuit sur lui-même ! Bien définir la fem, et dire qu'elle est en conventions générateur. Dire que cette loi est admise pour le moment, mais sera démontrée par la suite à partir des équations de Maxwell. Donner les exceptions à cette loi. Les commenter sans s'y attarder. Différencier cas de Lorentz, Neumann.

3) *Loi de Lenz* : énoncé, admise, loi de modération (lien avec la thermo), attention à ne pas tomber dans le revers d'énoncer simplement que les forces de Laplace s'opposent toujours au déplacement. Chute d'un aimant dans un tube métallique, explication heuristique.

II) Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

1) *Présentation générale* : On aura du mouvement dans un champ, donc une variation de flux. On écrira alors les équations électriques, qui donneront lieu à l'apparition d'un courant (avec ou sans prise en compte du flux propre), mais on aura aussi la force de Laplace qui interviendra. On aura donc à la fois des équations mécaniques et électrique, soit un couplage électromécanique. C'est ce type d'induction qui nous permettra de générer une action mécanique à partir de courant, ou de générer un courant à partir d'action mécanique. C'est ce qu'on va essayer de comprendre sommairement. Noter que Lenz nous donne que la force de Laplace s'opposera au déplacement ici, et qu'on aura aussi des effets du type freinage par induction.

2) *Alternateur* : on prendra le cas très simple d'une spire rectangulaire tournant dans un champ constant. Présentation, orientations, analyse physique. Équation électrique, équation mécanique, régime sinusoïdal, résolution en sautant des étapes, bilan énergétique, noter l'inversion possible : l'utilisation est réversible ! Dans cela est compris toute l'ingénierie électrotechnique.

3) *Chute d'une spire dans un champ magnétique constant* : exo dans le Tout-en-un sup nouveau programme et spé ancien programme : fem induite, force de Laplace, on a un freinage par induction (freins de camions, etc ...). Mais en pratique, on a négligé le champ créé par le courant dans la spire, il faudrait le prendre en compte !

III) Inductance propre

1) *Introduction* : Lien avec le dernier calcul, on a bien une intensité créée à partir de la fem. Mais on aura alors normalement un nouveau flux qui a été créé, et qu'il faudra prendre en compte dans la loi de Faraday, distinguer flux propre de flux extérieur ! On va développer des outils pour décrire ce genre de phénomènes. Noter que cette partie est purement électrique, il n'y aura pas d'équations de la mécanique. Bien noter que Lenz nous permettra de toujours prédire le sens du champ créé, exemple sur une spire dans laquelle on augmente le flux extérieur. Rappeler qu'on est souvent dans le cas d'un circuit immobile dans un champ mobile, mais ce n'est pas nécessaire

2) *Inductance propre* : Flux propre, inductance propre. Propriétés, unité, OdG, exemple sur un solénoïde, circuit électrique équivalent avec un champ extérieur, sens de la fem propre, convention récepteur ou générateur. Énergie et puissance, sens physique du terme électrocinétique qu'on avait, s'oppose aux variations de flux.

3) *Chute d'une spire* : retour sur la chute d'une spire (montre qu'on a un peu tout en même temps). Prendre le cas où la résistance est négligeable (supra conducteur), oscillation de la spire. Rajout de la résistance, ne pas faire le calcul, on a des oscillations amorties.

IV) Inductance mutuelle

1) *Inductance mutuelle* : En pratique, le champ extérieur est souvent par des bobines, d'où l'envie de généraliser la notion d'autoinductance. Définition, Henry, sens physique, propriétés, signe, petits exemples mignons, théorème de Neumann, dire qu'on est souvent dans le cas de Neumann, mais que ce n'est pas forcément nécessaire !

2) *Circuits RL couplés* : équations électrocinétiques, terme de couplage, équations énergétiques, énergie stockée dans le couplage.

3) *Le transformateur* : le faire le plus simplement possible, donner des exemples cool. Utilisation, transformateur d'isolement.

4) *Courants de Foucault* : applications, chauffage par induction (identification par énergie qui a disparue dans la chute de l'aimant dans le tube), feuilletage.

Commentaire : Je tenais à ne pas faire le rail de Laplace, parce que c'est un exemple banal, toujours fait, et que je trouve un peu pourri (avec des rails fixes par une force du support, etc... j'ai toujours trouvé que c'était plus embrouillant qu'autre chose) !

LP 21 : Résonance magnétique nucléaire

Bibliographie : Imagerie de résonance magnétique, de Michel Décorps, le Canet IRM, tout-en-un PC-PC* de chimie pour la spectroscopie IRM

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique classique, bases de physique quantique, physique statistique

I) Moments magnétiques et aimantation

1) *Moments magnétique nucléaire* : spin du noyau, lien avec le moment magnétique, quels noyaux ont des moments magnétiques non-nuls, et donc sur quels noyaux pourrons nous faire de la RMN ? On se concentrera sur la spectroscopie de proton, mais il y en a plein d'autres.

2) *Interaction avec un champ magnétique* : énergie d'interaction, fréquence de transition, OdG.

3) *Aimantation macroscopique* : statistique de Boltzmann, OdG, on aura des décalages tout petits, aimantation macroscopique et loi de Curie. Heureusement, ce sont des techniques de matière condensée, donc on a beaucoup d'atomes. On aura cependant à descendre le plus possible la température pour avoir un signal le plus fort possible, d'où l'intérêt de travailler à la température de l'hélium. Pour obtenir de l'information sur le milieu, on pourrait dès maintenant mesurer l'aimantation créée en réponse à l'excitation magnétique extérieure, pour obtenir des informations sur le rapport gyromagnétique des noyaux étudiés, et sur leur environnement proche. Cependant, une telle mesure est impossible, et c'est pour cela qu'on étudie le phénomène de RMN, la relaxation nous donnant des informations sur les fréquences de résonances, et donc sur l'information qu'on voulait avoir !

II) Mouvement dans un champ magnétique

1) *Précession libre* : faire le calcul, on sait que c'est un mouvement de précession, pulsation caractéristique. Parler dès maintenant de la relaxation, au bout d'un temps donné.

2) *Application d'un champ tournant* : présentation, on se place dans le repère tournant, résolution. Cas particulier, si le champ tournant tourne à la fréquence de rotation dû au premier champ, on va pouvoir faire tourner le moment magnétique autour du champ tournant. Impulsion $\pi/2$, OdG.

3) *Réalisation pratique* : on envoie un champ polarisé rectilignement. Division en deux polarisations circulaires, seule une tourne à la vitesse de précession due au premier champ, et a une efficacité non négligeable. On pourrait aussi envoyer un champ à une seule fréquence, et tout tester au fur et à mesure, mais on va envoyer un pulse, qui va contenir plein de fréquences, et on aura alors toutes les résonances en même temps, ce sera beaucoup plus facile à traiter et rapide. Transition : on voit que nos noyaux ne résonnent qu'à une seule fréquence, qui est due à leur rapport gyromagnétique, mais aussi à leur environnement proche qui va jouer sur le champ magnétique qu'ils vont voir. En testant cela, on va pouvoir avoir des informations sur les noyaux. C'est ce qu'on va essayer de faire. Mais pour pouvoir détecter les résonances, il va falloir avoir des informations sur la relaxation qui a lieu une fois que le moment magnétique a été déplacé.

III) Relaxation des moments magnétiques

1) *Différentes relaxations* : présenter les deux types de relaxation, spin-réseau et spin-spin, et comment on va les modéliser. On prend un modèle simple et phénoménologique. Comparaison entre les deux temps de relaxation.

2) *Équations de Bloch* : on prend ces deux relaxations en compte, et on écrit les équations de Bloch. On pourrait les démontrer à partir de la mécanique quantique, mais ce n'est pas nécessaire pour comprendre le phénomène ici. Attention, il est impératif de noter que les équations de Bloch décrivent l'évolution de l'aimantation du système, mais pas d'un seul moment magnétique ! On peut alors écrire la forme générale de la relaxation. En pratique ce n'est pas simple, et on fait pas mal d'approximations.

3) *Inhomogénéités de champs* : nouveau temps caractéristique à prendre en compte, donc nouveau temps caractéristique. Mais on n'entrera pas dans ces détails techniques. Ce qu'il faut savoir, c'est qu'on va introduire un nouveau temps caractéristique. En pratique, il y a plein de bobines de corrections, et tout un travail est fait sur l'homogénéisation du champ, pour avoir des précisions de l'ordre de un pour un million, et plus encore. On note que la façon la plus précise pour tester l'homogénéité du champ est ... de faire une RMN.

4) *Mesure* : pour cela, on a une fem créée sur des bobines judicieusement disposées, car des moments magnétiques tournants vont donner des effets inductifs. Il y a bien sûr beaucoup de considérations d'électronique à faire pour optimiser le rapport signal sur bruit, et avoir un signal le plus précis possible, car il est très petit ; on n'entrera pas dans les détails. On fait aussi beaucoup de mesure successives afin de pouvoir moyenner.

IV) Déplacement chimique et spectre de RMN

1) *Blindage et constante d'écran* : origine, cela permet d'identifier de manière unique chaque noyau.

2) *Déplacement chimique* : c'est la façon qu'on les RMN-istes de représenter les spectres, définition, réaliser la précision importante, qui demande une précision à cet ordre pour toutes les considérations Oo, le spectre est obtenu par transformée de Fourier du signal reçu, on n'entrera pas dans les détails techniques. Nécessité d'une référence, exemple du TMS pour la spectroscopie du proton. Montrer un joli spectre, on voit qu'on a des séparations de raies, c'est dû au ...

3) *Couplage spin-spin* : présentation, interaction dipolaire et scalaire, OdG, portée, analyse sur un spectre.

4) *Applications* : exemples des domaines d'applications, physique, chimie, biologie, médecine. Présentation d'un module de RMN de chimiste, blablabla, ok.

Commentaire : Connaître les bases du traitements quantiques, et les applications multiples et variées de la RMN. S'extasier devant la beauté extrême de l'achèvement technique et scientifique que représente la RMN.

LP 22 : Rétroaction et oscillation

Bibliographie : Tout-en-un PSI-PSI*, Hprépa électronique I PSI-PSI* (le vert), Duffait d'électronique (si si!)

Niveau : CPGE PSI

Pré-requis : Électrocinétique des systèmes linéaires, filtrage linéaire, amplificateur opérationnel

I) Systèmes bouclés

1) *Nécessité des systèmes bouclés :* introduire ça comme quelque chose de naturel, que l'on fait en fait très spontanément nous-même. Commande de position, on essaye en boucle ouverte. On voit bien que c'est foireux. On rajoute un capteur, ça marche nickel. Parler d'asservissement et de régulation. En pratique c'est général. D'où le concept de rétroaction.

2) *Structure générale d'un système bouclé :* présenter proprement, bien différencier l'électronique de puissance et l'électronique de signal. Préciser que l'amplificateur a forcément une alimentation extérieure en énergie. Retour sur le système de l'exemple. Calcul de la fonction de transfert, boucle ouverte, boucle fermée. Comparer a priori les valeurs absolues des différents termes de la fonction de transfert.

3) *Amélioration apportée par la rétroaction :* variation de la chaîne directe, ou de la chaîne de retour, influence d'en décalage en sortie. Application à l'industrie, on peut construire de l'électronique de puissance bourrin, on s'en fout, on construit par contre de l'électronique de signal de grande précision, ok!

4) *Caractéristiques d'une rétroaction :* parler précision, rapidité, dépassement, etc ... Faire l'exemple avec un système total d'ordre 2, on se ramène à un RLC soumis à un échelon de tension comme on l'a vu en première année. Discussion sur le fait d'avoir la consigne le plus rapidement possible. Différents critères : consigne à 5%, avec ou sans dépassement ? On peut jouer sur les paramètres, et on comprend que plusieurs paramètres sont antagonistes. Tout est question de compromis et de doigté! Ici on se contentera de faire sentir ce genre de problème de critères antagonistes, mais sans trop entrer dans les détails, comme c'est fait dans le programme, et ce n'est pas évident.

II) Stabilité et oscillations

1) *Apparition d'instabilité :* Travaillons avec l'exemple d'un AO dans la chaîne d'amplification. On sait que si on se débrouille mal, il va saturer. Bon c'est gênant, et on comprend qu'il va falloir faire attention. Mais il y a bien pire : en pratique, la sortie de l'AO revient sur elle-même, donc si une composante spectrale revient avec un gain supérieur à 1, et un déphasage nul, il va s'amplifier à l'infini! (modulo la saturation). On comprend aussi que même avec un peu de déphasage, si on a un gain plus grand que 1, on pourra aussi avoir des instabilités. Il va falloir gérer cela, et quantifier la stabilité du système.

2) *Critère de stabilité :* écriture de la fonction de transfert, si elle diverge, on va avoir une instabilité. On commence par voir que l'ordre du dénominateur doit être plus grand que l'ordre du numérateur, sinon divergence à haute fréquence. Puis repassage en réel pour comprendre que les parties réelles (si on est en p , sinon imaginaires) doivent être à partie réelle strictement négative, sinon il y a divergence, on a déjà étudié la résolution de ces ED. On introduit donc le critère complet de stabilité. Cas des systèmes d'ordre 3 ou plus, on recherchera en pratique manuellement la valeur pour laquelle il y a annulation du dénominateur, Barkhausen. Attention, il peut être tentant d'interpréter le critère des coefficients de même signe pour l'ordre 2 comme la possibilité d'annulation du dénominateur, mais ce n'est pas possible en pratique, car il restera toujours un terme imaginaire qu'on ne pourra pas simplifier ; la seule façon pour expliquer cela simplement semble de se ramener au fait qu'on a simplement une équation caractéristique, et qu'on veut des exponentielles convergentes. Le critère de Descartes se démontre alors simplement en écrivant les deux racines (complexes ou non) et en développant le polynôme, ce qui est à savoir, mais évidemment pas à développer ici.

3) *Création d'oscillateur :* on a vu que les instabilités étaient gênantes, mais ne peut-on pas les utiliser pour faire des oscillateurs ? Si, mais pour cela, il faudra si possible qu'une seule fréquence soit instable, pour avoir un signal utilisable. En pratique, les systèmes bouclés peuvent servir à cela. Bien rappeler que il y a forcément une alimentation, et qu'on aura des phénomènes non-linéaires dans la bataille (même si une ED linéaire semblera régir le système), par exemple expliquer que la fonction de transfert n'est plus valable quand on a dépassé un pôle de celle-ci. Généralité sur les oscillateurs, quasi-sinusoidaux ou à relaxation,

on va commencer par étudier le premier.

III) Oscillateur à pont de Wien

1) *Présentation du montage* : le diviser en deux blocs, présenter chacun des blocs, fonction de transfert du filtre. Bien préciser qu'il n'y a pas de rétroaction négative. On peut se ramener à l'équation générale, mais on peut aussi faire ça à la main sans problème, c'est ce qu'on va faire. Une manip est montée, on la présente au fur et à mesure.

2) *Étude en boucle ouverte* : on va chercher à amplifier une seule fréquence, l'utilisation du passe-bande est idéale, recherche de la fréquence centrale, recherche de l'amplification pour avoir un gain de 1.

3) *Oscillations en boucle fermée* : on remet le système, on dépasse l'amplification critique, tadaaaa! Montrer les distorsions apparaissant quand on augmente l'amplification, saturation, apparition de haute fréquences, etc ...

4) *Retour sur le critère de stabilité* : on va écrire la fonction de transfert, attention au moins qu'on rajoute si utilisation de la formule systématique. On s'est bien mis à la limite du pôle. Retour en notations réelles, on voit qu'on a une équation différentielle d'ordre 2 divergente, on connaît la solution, on peut la visualiser, c'est cool!

5) *Généralisation* : système similaire, on recherche le pôle, on se met juste à coté, critère limite de Barkhausen (Ach!!), ça va toujours marcher, c'est génial. Ouverture sur l'oscillateur à Quartz.

IV) Oscillateur à relaxation

1) *Schéma général* : blablabla.

2) *Générateur de signaux rectangulaires* : ne pas mettre les mains dans le cambouis, tout est explicable sans formule très simplement, c'est ce qu'il suffit de faire. Noter que l'oscillateur génère aussi des signaux triangulaires, selon la position de la prise de tension.

LP 23 : Traitement analogique d'un signal électrique, étude spectrale

Bibliographie : Tout-en-un MPSI/PTSI (programme 2013) Dunod. Le vieux H-prépa vert de PSI-PSI* est presque incontournable en complément, une vraie merveille sur le sujet, avec trois gros chapitres bien faits. Pour les réfractaire du fait de le faire en sup, noter en fait que ça permet de synthétiser trois gros chapitre de PSI avec les mains, ce qui, si c'est bien fait, est aussi très intéressant, tout-en-un PSI/PSI*

Niveau : CPGE PTSI

Pré-requis : électrocinétique en transitoire et en RSF, notations complexes, analyse fréquentielle d'un système linéaire (gain, diagramme de Bode)

Introduction : on a étudié des réponses à des entrées sinusoïdales, on va voir à présent comment Fourier nous permet de tout étudier à partir de l'étude précédente, et comment on peut l'appliquer à l'étude d'un signal, et au traitement du signal.

I) Décomposition de Fourier

1) *Analyse spectrale* : Fourier 1822, équation de la chaleur, décomposition générale, contenu du spectre (f_i, A_i, ϕ_i), vocabulaire.

2) *Représentation graphique du spectre* : spectre d'amplitude, d'énergie, de phase, sens physique. Exemple sur deux ou trois sinus déphasés. Équivalence entre le signal temporel et le spectre.

3) *Signal périodique quelconque, série de Fourier* : décomposition en série de Fourier, vocabulaire, sens de chaque terme. Ouverture aux transformées de Fourier.

4) *Contenu spectral d'un signal* : montrer la synthèse de Fourier d'un créneau (sur les images fournies), en donnant la formule. Énoncer les propriétés sur la valeur moyenne, les basses et les hautes fréquences. Phénomène de Gibbs. Noter qu'en pratique, les GBF ne fonctionnent pas comme cela, mais plutôt avec des oscillateurs quasi-sinusoïdaux ou à relaxation, cf la leçon précédente.

II) Réponse d'un système linéaire en RP

1) *Systèmes LTI* : définition, linéarité, invariance dans le temps, exemple. Différence entre le traitement analogique et numérique.

2) *Réponse à une entrée sinusoïdale* : introduction de la fonction de transfert, linéarité et conséquence sur la fréquence de sortie. H contient toute l'info pour une entrée sinusoïdale.

3) *Réponse à une entrée périodique* : décomposition en série de Fourier + linéarité, H contient bien toute l'info! Ouverture aux transformées de Fourier.

III) Filtrage linéaire et analyse spectrale

1) *Cadre* : on fera du filtrage sur un créneau pour étudier les différentes composantes spectrales et observer les propriétés de la décomposition de Fourier.

2) *Filtre passe-bas* : faire avec un RC, prendre les deux cas limites, superposer le(s) diagramme(s) de Bode au spectre du signal, commentaire sur les HF, BF, valeur continue, comportement intégrateur. Application au moyennneur.

3) *Filtre passe-haut* : faire avec un RC, deux cas limites, superposer le(s) diagramme(s) de Bode au spectre du signal, commentaire HF, BF, valeur continu, comportement dérivateur.

4) *Filtre passe-bande* : Un filtre passe bande tout fait existe sous forme de petite boîte dans la collection (il est préférable à la création d'un filtre RLC soit même, car celui-ci sera de mauvaise qualité, et son facteur de qualité variera avec la fréquence de résonance), sélectionner une fréquence sinusoïdale, commentaire.

5) *Réponse indicielle et contenu spectral* : créneau contient toutes les fréquences, bon test. Lien avec les filtres déjà étudié, réponse temporelle et fréquentielle. Propriété observable, HF, BF, valeur initial, discontinuité, ordre 1 ou 2, informations sur le filtre.

IV) Traitement analogique d'un signal électrique

1) *Gabarit* : utile pour cahier des charges, on se restreint au gain. Cas simples, nécessité de systèmes plus compliqués. Fréquences et gains caractéristiques.

2) *Traitement linéaire* : toutes les opérations possibles, garder/éliminer une fréquence, dériver/intégrer, garder/éliminer la valeur moyenne, forme générale ou détails, etc ...

3) *Application* : France inter, ou un autre exemple marrant.

Commentaire : Ne pas perdre de temps sur les manips, elles doivent être parfaitement prêtes au début de la leçon, ne pas hésiter à demander pas mal de matériel pour ne pas avoir à manipuler outre mesure pendant la leçon.

LP 24 : Ondes progressives, Ondes stationnaires

Bibliographie : Tout-en-un, Soutif, Perez d'Optique (oui oui), Berkeley sur les ondes, ...

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Mécanique, électrocinétique, et électromagnétisme du vide (simplement les équations de Maxwell, et la dérivation de l'équation de d'Alembert)

Commentaire : Pour avoir une rare explication un peu claire de l'impédance, jeter un coup d'œil au Berkeley sur les ondes n'est pas inutile. On voit notamment que cela ressort en fait d'une description au premier ordre d'un milieu continu, avec un terme quantifiant son caractère élastique, et l'autre quantifiant son caractère inertiel, d'où son côté très général. En effet, d'Alembert n'est que les termes minimaux pour avoir un phénomène propagatif, c'est pourquoi on l'obtient souvent en faisant la description la plus simple de la physique étudiée, et en voulant faire apparaître de la propagation d'onde. Et quels sont les deux termes dont on a besoin pour cela ? tadaaa !

I) Onde et équation d'onde

1) *Corde vibrante* : introduction du système, paramétrage, résolution avec un DL à l'ordre 1. Préciser qu'on va étudier des ondes transverses. Montrer proprement et rapidement le calcul, mais ne pas perdre de temps. Donner, mais sans justification l'énergie cinétique et potentielle par unité de longueur, les introduire via des analogies, notamment comme force de rappel pour l'énergie potentielle. On arrive à l'équation de d'Alembert sur la variable déplacement transverse.

2) *Onde, équation d'onde* : Donner la définition d'une onde de façon très générale, comme fonction de l'espace et du temps satisfaisant une équation d'onde, à savoir comportant des dérivées partielles en l'espace et le temps¹³. Dire que c'est très générale, et que c'est de toute façon inutile d'essayer de donner une définition vraiment précise des ondes. Donner plein d'exemples au programme. On a aussi introduit l'équation d'onde. Donner des exemples d'équations au programme. Parler de linéarité et d'invariance par renversement du temps, mini lien avec la conservation de l'énergie. Expliquer que connaître l'onde, c'est aussi avoir des informations sur le milieu.

3) *Équation de d'Alembert* : définition. Donner sa forme scalaire et vectorielle. Linéarité, réversibilité, célérité qui apparaît, c'est la vitesse de propagation. Donner l'exemple du câble coaxial et des ondes électromagnétiques dans le vide, mais sans faire les calculs. Valables pour de nombreuses quantités physique, par exemple les champs électriques et magnétiques, mais aussi la tension et l'intensité, comme la vitesse, la position, et la tension sur la corde. Introduire le fait que pour avoir propagation, on a souvent nécessité de grandeurs couplées. Dire que sa généralité vient que toute propagation nécessite de tels termes. En pratique c'est souvent approché, on néglige les dissipations (cf coax) et on fait des DL à l'ordre 1 (cf Melde). Il faut souvent rajouter des termes pour décrire plus précisément la physique ; par contre elle est exacte pour les ondes électromagnétiques dans le vide.

4) *Conditions aux limites, conditions initiales* : donner les définitions propre des deux, donner des exemples, notamment sur la corde de Melde. Dire qu'il y a plein de théorèmes d'unicité, mais qu'on les admettra souvent en physique.

II) Ondes progressives

1) *Ondes planes progressives* : définition, dire que c'est une définition pour des champs définis sur l'espace, et que ça a peu de sens sur une géométrie 1D comme la corde de Melde, même si ça revient au même. Démontrer que c'est solution de l'équation de d'Alembert. Par la suite, on les prendra harmoniques, mais ce n'est pas nécessaire, bien mettre cela en avant, on peut avoir une onde quelconque plane progressive. Joli dessin d'une perturbation en forme de cristal de Bismuth qui se propage.

2) *Onde sphérique progressive* : Définition, de même en espace 3D, terme en $1/r$ qui est un peu différent, démontrer que c'est bien une solution de d'Alembert, évoquer des problèmes de divergence au centre, et dire que le centre parfaitement ponctuel n'est qu'une modélisation, mais qu'en pratique pour gérer les

13. Attention, beaucoup de définitions pourries traînent dans la communauté physicienne. Outre le fait de se demander si c'est vraiment utile de donner une définition claire d'une onde, il faut tester rapidement ces définitions en regardant si elles sont compatibles avec ce qu'on appelle "équation d'onde", et ce n'est souvent pas le cas ...

divergences, il faut prendre en compte le caractère fini de l'émetteur ou du récepteur. De même pas forcément harmonique, même si on le prendra par la suite.

3) *Base de solution* : ce sont des bases adaptées des solutions. Elles sont complètes, et chaque terme de l'un peut s'écrire comme somme des autres (puisque bases complètes...). En fait, elles sont transformées de Fourier l'une de l'autre. Souvent, on choisit la base utilisée en fonction des CL, on regarde quelles ondes peuvent exister, et on utilise les CI pour donner l'amplitude de chaque terme. On verra cela plus précisément sur les ondes stationnaires. Les ondes planes sont adaptées pour les équations différentielles (qui ont souvent des opérateurs impulsion/dérivées), et les ondes sphériques sont adaptées aux conditions aux limites. Bien mettre en avant la dualité entre espace des vecteurs d'onde et espace géométrique.

III) Propagation et grandeurs couplées, notion d'impédance

1) *Grandeurs couplées* : pour la corde de Melde, on a montré l'équation sur le déplacement transverse, mais on a en fait des équations couplées avec deux autres grandeurs qui apparaissent naturellement. Noter qu'on aurait pu prendre le déplacement transverse, mais que cela n'apparaît pas très intuitif physiquement parlant au vu de la dérivation des équations du mouvement. De même pour les deux autres exemples. Possibilité de montrer d'Alembert sous forme matriciel avec les deux équations couplées, dont d'Alembert est en fait le déterminant.

2) *Notion d'impédance* : la présenter, cela va être très pratique par la suite, mais rappeler que ce n'est valable que pour des milieux homogènes isotropes, ou en tout cas approximables comme cela au vu des dimensions caractéristiques. Correspondance entre les deux paramètres décrivant le milieu et les deux ondes. Ne pas se perdre en de trop grandes considérations mystiques qui pourraient titiller trop dangereusement le jury.

3) *Interface plane entre deux milieux LHI* : deux cordes avec chocs, onde réfléchie et transmise, et de même avec les différents systèmes. Plane = de rayon de courbure grand devant la longueur d'onde. Continuité des grandeurs couplées, on a alors les coefficients de réflexion et de transmission, par les formules de Fresnel. C'est en fait très général, et on les utilisera souvent. Adaptation d'impédance, une petite expérience avec un coax peut être amusante. Milieu fermé sur son impédance.

4) *Énergétique* : Récapitulatif sur transparent pour les différents exemples évoqués. Équation générale de conservation de l'énergie. Lien avec l'impédance et la vitesse de propagation dans le milieu. Vitesse de propagation de l'énergie : ici c'est la vitesse des ondes, car on n'a pas de dispersivité, cf discussion du I.3.

IV) Ondes stationnaires

1) *Définition* : Découplage du temps et de l'espace, résolution de d'Alembert avec ce type d'onde. Base complète de solution. Décomposition d'onde stationnaire comme somme de deux ondes progressives.

2) *Conditions aux limites* : en fait, décrit des ondes qui rebondissent, seules certaines ondes n'interfèrent pas, blablabla. Corde de Melde, résolution, nœud, ventre. Application à la guitare, note, répartition spatiale des frètes d'une guitare, dissipation par frottement avec l'air, et aussi par rayonnement d'onde acoustique (!!!). En pratique, les CI donnent l'amplitude de chaque mode, cf discussion du II.3.

3) *Énergie* : somme des énergies des différents modes, dû au fait que la base est orthogonale, ce qui est une expression du théorème de Parseval.

Conclusion : ouverture sur ondes plus compliquées, et notamment sur dispersion.

LP 25 : Ondes acoustiques

Bibliographie : Tout-en-un Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, tec&doc PC-PC* Gié (jaune), ondes mécanique et diffusion (Garing)

Niveau : CPGE PC ou PSI

Pré-requis : Physique des ondes, dynamique des fluides.

Remarque : pour ne pas faire une leçon où on présente juste du cours, il me semble mieux de faire paraître la troisième partie comme appliquée, et voir comment on peut justifier les instruments à vents. En pratique, le contenu est surtout du cours.

I) Modèle des ondes acoustiques

1) *Équations dynamiques et thermodynamiques* : De quelles équations disposons nous : NS, et conservation de la masse. Dénombrement équations/inconnues, on rajouter une équation thermodynamique, par exemple ici la masse volumique en fonction de la pression. En fait, en sous-entendant que la masse volumique ne dépendait que de la pression, on a déjà fait une approximation (l'approximation barotropique), mais ne pas s'étendre là-dessus.

2) *Linéarisation des équations, approximation acoustique* : c'est dans cette partie qu'il faut expliciter précisément toutes les approximations qu'on fait, et qui composent l'approximation acoustique, donc le faire avec soin. Fluide supposé parfait (blablabla qui donne isentropique, on découple donc l'entropie de l'étude, cf approximation barotropique), gravité négligée (en fait on peut la prendre en compte dans la pression statique, mais ça complexifie un peu les calculs, donc on précisera qu'un champ de pression statique non-uniforme n'a pas d'importance tant que ses variations se font sur des longueurs grandes devant les longueurs d'onde sonore; en pratique pour les très basses fréquences, il est intéressant de noter que notre modèle n'est plus forcément valide). Définition de l'état d'équilibre. Observation expérimentale de l'ordre de grandeur des surpressions : on va pouvoir faire une étude perturbative. Introduction des perturbations à l'ordre 1, variables adimensionnées. On ne peut pas adimensionner la vitesse, on prend une vitesse caractéristique qu'on donnera plus tard dans le développement. Pour l'équation d'état thermodynamique, elle se révèle être simplement un DL. On clôt le système sous forme couplée, et on écrit l'équation de propagation pour la surpression. Expression de la vitesse caractéristique, que l'on appellera par la suite la vitesse du son.

3) *Célérité du son* : Expression pour les fluides, on pourrait prendre a priori n'importe quelle compressibilité, on prend l'isentropique, car l'évolution l'est. Petit graphe de la pression fonction de la masse volumique, représenter les différentes évolutions à partir d'un point (en mettant les bonnes courbes, pour cela utiliser les invariants de Laplace et la loi des GP), à savoir celle de température constante et l'isentropique. Valeur numérique, comparaison à l'expérimentale, l'isentropique semble une bonne description du phénomène. Vitesse du son dans les solides, légère digression sur le modèle de la chaîne d'oscillateur, avoir en tête le concept de vibrations collectives.

II) Propagation des ondes sonores

1) *Ondes acoustiques planes progressives* : modèle simple à décrire, ici on a linéarité, donc on peut juxtaposer. Noter que c'est après avoir fait l'approximation acoustique qu'on a linéarité, ce n'était pas le cas avant ! Équation de d'Alembert, formalisme, impédance, etc ...

2) *Aspect énergétique* : densité volumique d'énergie et Pointing sonore, bien mettre en avant le sens physique de chacun des termes, préciser dès le début qu'on ne s'intéresse qu'aux phénomènes oscillants pour ne pas avoir à le redire à chaque fois. Équation locale de conservation de l'énergie. Intensité sonore, décibel. Magnifique exemple de la sonorisation d'un concert (si on est un peu désaxé par rapport aux enceintes, on a l'impression d'en entendre seulement une seule, c'est dû au fait que l'intensité ressentie est en décibel). On peut en profiter pour remarquer le remarquable travail de décomposition spectrale du son effectué par notre cerveau, en effet je vais avoir l'impression qu'une des enceintes n'émet pas, car elle émet exactement la même chose que l'autre, mais j'entendrai très bien un autre bruit qui a un spectre différent.

3) *Retour sur les approximations* : OdG multiples et variés, ainsi qu'évidemment ludiques et récréatifs. (Approximation de Mach : fait qu'on puisse négliger la compressibilité de l'air pour des écoulement de nombre de Mach $< 0,3$). Viscosité et diffusion thermique.

III) Application aux instruments de musique

1) *Conditions aux limites* : continuité de la vitesse et de la surpression, dire ce qu'on a comme condition au limite stricte dans une flûte.

2) *Coefficient de réflexion et de transmission* : Balancer Fresnel car impédance, les calculs ont déjà été faits, ne surtout pas les faire! En puissance, éventuellement, blabla sur l'adaptation d'impédance.

3) *Ondes stationnaires* : tuyaux sonores, ventres et nœuds, le faire par une méthode heuristique, en évitant au maximum les calculs. Tuyau ouvert sur l'extérieur? Avec notre modélisation le son ne sort pas! Impédance des ondes sphériques?

4) *Modèle de la sphère pulsante* : cf Tec&Dox Gié PSI/PSI*, impédance des ondes sphériques, cela explique que notre flûte rayonne bien des ondes acoustiques, et qu'on peut l'entendre.

LP 26 : Propagation dans un milieu dispersif

Bibliographie : Tout-en-un vieux et anciens, un peu de tout, bup 649 (dispersion, vitesse de phase), le tome 8 du Landau, électromagnétisme des milieux continus, est un des seuls livres que j'ai trouvé qui fait un vrai topo sur Kramers-Krönig

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis : Électromagnétisme du vide, optique, notions d'hydrodynamique, étude de l'équation de d'Alembert

Introduction : D'Alembert était cool, mais pour phénomènes simples, en pratique c'est un peu plus compliqué. Les différentes fréquences vont à des vitesses différentes. Petite manip de la déviation de la lumière par un prisme.

I) Phénomène de dispersion

1) *Équation d'onde et relation de dispersion* : on avait d'Alembert qu'on a étudié, mais il y en a d'autres, notamment KG pour étudier la propagation d'une OEM. Avant, toutes les OPPS allaient à la même vitesse, maintenant ce n'est plus le cas. On va cependant les utiliser pour décrire la physique, car linéarité. Passage aux notations complexes, relation de dispersion. On expliquera son nom par la suite.

2) *Forme des solutions* : Utilisation de la transformée de Fourier pour l'écriture générale de la solution sous forme d'OPPS, cependant, avec l'ajout de l'équation d'onde, équivalente de la relation de dispersion, on rajoute un dirac en $\delta(k - k(\omega))$ dans la décomposition de Fourier, et on n'a plus qu'une intégrale sur les fréquences. Et maintenant, le terme en exponentielle complexe n'est pas si simple qu'avant, car on a $k(\omega)$ dedans, c'est ce terme particulier qu'on va étudier.

3) *Vitesse de phase* : à comprendre comme une « vitesse de phase constante », à quelle vitesse aller pour laisser cette composante spectrale inchangée. Note sur d'Alembert, quand k est proportionnel à ω . Résultat pour KG, on obtient des vitesses supraluminiques, mais c'est pas grave, c'est cool bro! Retour sur l'expérience du prisme, loi de Cauchy pour l'indice, lien entre n et la vitesse de phase, vitesse de phase fonction de la pulsation, ok! En pratique, via Fermat, on sait que c'est cette différence de vitesse qui cause la différence de trajet. Mais maintenant qu'on a vu que la vitesse n'était pas physique, cf KG, comment décrire la vitesse d'un signal physique ?

II) Paquets d'onde, vitesse de groupe

1) *Paquet d'onde* : on veut représenter un signal comme une perturbation localisée qui se déplace dans l'espace. Représentation par fonction qui prend des valeurs non négligeables sur un petit domaine spectral. Petites propriétés de Fourier, lien entre taille sur l'espace des position et des impulsions, largeur du paquet d'onde, cas limite.

2) *Vitesse de groupe* : considérer le paquet d'onde qui avance, blablabla, on arrive à la vitesse de groupe, qui a un sens physique. Attention, elle dépend de la fréquence, ça n'a pas une valeur absolue pour un type d'onde donné. Cas Klein-Gordon, valeurs, relation avec vitesse de phase, pas supraluminique, c'est rassurant. Petite animation faite sur Igor avec Klein-Gordon (cf tout-en-un).

3) *Dispersion du paquet d'onde* : les plus grandes vitesses de phase vont aller plus vite, les plus petites moins, on va avoir dispersion du paquet d'onde. Retour sur la petite animation, cool! Cas des ondes de surface, présenter graphiquement l'équation d'onde, différents régimes, ce qui se passe quand on jette un caillou dans l'eau (cf BUP), donner des mouchoirs au jury.

III) Lien avec l'absorption

1) *Vecteur d'onde et absorption* : si k est complexe, séparation en partie réelle, partie imaginaire, blablabla, écriture de l'exponentielle complexe. Produit des deux parties, cas particuliers et exotiques.

2) *Ligne électrique* : modélisation sans résistance, avec résistance, on voit qu'il prend en compte l'absorption pour avoir la dispersion, ça peut sembler bizarre, mais en fait, notamment pour la traversée de l'onde dans les milieux, c'est normal.

3) *Relations de Kramers-Krönig* : quand une onde traverse un milieu, il excite ce milieu, qui génère à son tour des ondes, qui viennent se superposer aux premières. Le tout est pris en fait en compte dans l'équation d'onde. Mais, si causalité, on a Kramers-Krönig, et lien entre absorption et dispersion. C'est

pour ça que les courbes des parties réelles et imaginaires de k semblent être liées. Cependant, il y a des limitations, il faut que la physique soit linéaire, ce qui n'est en fait rarement le cas de façon exacte, mais souvent une très bonne approximation.

Remarque : Il est important de noter que Kramers-Krönig n'est valide que pour des équations d'onde "en bulk", avec une réponse linéaire, il ne faut pas extrapoler ces beaux résultats plus que cela.

Remarque : On trouve aussi dans beaucoup de références que les conditions aux limites créent de la dispersion. Avant de se lancer tête baissée dans cette voie, il faut se poser la question sur ce qu'on appelle dispersion. Est-ce le fait que des fréquences différentes vont à des vitesses différentes, ou bien le simple fait de séparer les fréquences? (oui, ce n'est pas la même chose...). En soi, des conditions aux limites types celles qu'on retrouve dans un guide d'onde ne font que sélectionner certaines fréquences. Si on prend une interprétation en ondes planes, on voit de plus que les conditions d'existence de fréquences dépendent de l'inclinaison de l'onde par rapport au guide. Ainsi, ces ondes planes allant à la même vitesse (car étant décrites par d'Alembert), elles se "séparent" car ont des inclinaisons différentes, mais il n'y a pas à proprement parler de dispersion, dans le premier sens que j'ai donné (puisque justement, on a d'Alembert!!). Donc il faut bien faire attention, tout est une question de vocabulaire, et de ce qu'on appelle précisément dispersion.

LP 27 : Propagation guidée des ondes

Bibliographie : Dunod tout-en-un MPSI/PTSI (nouveau programme) et MP/MP*, Feynman électromagnétisme 2, la compo 2009 sur les instruments de musique fait entièrement les guides d'onde acoustique,

...

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Optique géométrique, équations de Maxwell, ondes électromagnétiques, ondes électromagnétiques dans un conducteur, acoustique.

Introduction : on a étudié pour l'instant des ondes libres de se propager dans un espace 3d, maintenant on va étudier la propagation confinée sur plusieurs directions de l'espace : il va y avoir des ondes guidées

I) Guides d'ondes

1) *Présentation* : but des guides d'ondes, canalisation en énergie et en directivité. Exemples multiples pour des ondes différentes : instruments de musiques, câbles coaxiaux, guidage d'onde électromagnétique, fibres optiques, etc ...

2) *Confinement des ondes* : en pratique cela apparaîtra dans les CL dans nos étude. Réflexion sur un conducteur parfait, approximation, cas du cuivre bon conducteur. Acoustique, CL sur un solide, ok. Optique géométrique, saut d'indice et réflexion totale. Ouverture sur gradient d'indice.

3) *Caractéristiques d'un guide d'onde* : dispersion, atténuation, coût. Fait de pouvoir la courber, cf la fibre optique. Problème de la dispersion des différents modes, on va voir si on peut le régler

II) Approche ondulatoire

1) *Guidage acoustique ou électromagnétique* : donner les équations vérifiées par les grandeurs couplées dans le vide ou l'air, et la technique de confinement. On étudier deux plans infinis pour simplifier. Passage au modes transverses électriques, qu'on peut isoler. On voit que le problème sera alors le même pour les deux. On va faire par la suite de l'électromagnétisme, mais en fait c'est la même chose, et ce sera la même chose pour toutes les ondes décrites par d'Alembert et des conditions aux limites strictes, ce qui est souvent pour le cas pour les phénomènes ondulatoires en première approximation, grande généralité.

2) *Résolution* : le faire proprement et rapidement pour deux plans conducteurs parfaits infinis, bien visualiser le sens des équations différentielles, et la forme des solutions. Appuyer sur le fait que même si la forme des ED semble être KG, on ne travaille pas avec des OPPS, donc il ne faut pas se tromper! Résolution sur les modes.

3) *Modes* : relation de dispersion et fréquence de coupure. Parler des modes. Vitesse de phase et de groupe des différents modes. Blablabla. Quels modes garder, cas monomode, condition simple ou exclusive pour avoir un mode.

4) *conducteur rectangulaire ou circulaire* : commencer par le rectangulaire, de même avec doublement du dénombrement des modes, faire un joli dessin. Pour les circulaires, introduction de la fonction de Bessel, ok, c'est cool.

III) Approche géométrique

1) *Fibre à saut d'indice* : résolution en optique, noter l'apparition de mode, vitesse des modes, fibre monomode, etc ... MAIS ... c'est très proche de ce qu'on a fait précédemment, est-ce qu'on ne peut pas faire une analogie?

2) *Résolution en ondes planes* : interprétation du rayon qui rebondit comme des ondes planes qui interfèrent pour redonner les bonnes conditions aux limites. Rappeler que "je peux introduire autant de source fictive que je le souhaite, si les conditions aux limites sont équivalentes, alors la physique sera la même". Conditions de recouvrement, blablabla, on retrouve rapidement les mêmes résultats, analogie avec le 1), ok.

3) *Source réelle* : mais, ok, on a des modes, mais comment ça se passe avec une vrai source? Introduction des sources fictives par les images successives, assez loin on a des ondes planes, car c'est du champ lointain + considérations sur les tailles caractéristiques, et elles doivent être en phase sinon elles interfèrent destructivement. Apparition de conditions strictes d'interférences, ok, on comprend bien, énergie

seulement contenue dans les interférences constructives (bien se mettre en tête que les ondes planes n'ont pas de signification physique, même si on a tendance à le croire).

4) *Guide d'onde acoustique* : le faire avec des piézoélectriques et un générateur de pulse, bien rappeler qu'on est à une fréquence donnée (ici la résonance du piézoélectriques). Apparition des différents modes qui ont des vitesses de groupe différentes. Noter que ces modes sont plus ou moins bien reçus selon l'inclinaison de l'émetteur ou du récepteur, c'est normal, retour sur les considérations géométriques. En profiter pour ouvrir sur le fait que comme on a un paquet d'onde, on n'a pas seulement une fréquence donnée, c'est normal, car les conditions aux limites ne sont en fait pas strictes, on a pénétration sur une petite couche pour les conducteurs, de même petites déformations des solides dans la flûte. Ouverture finale sur la fibre à gradient d'indice qui permet de compenser les angles différents (et donc les trajets de longueurs différentes) par des vitesses différentes.

LP 28 : Ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique

Bibliographie : Tout-en-un PC/PC*, BFR électromagnétisme des milieux, Tec&Doc PC/PC*, etc ...

Niveau : CPGE 2ème année, PC

Pré-requis : Onde électromagnétiques dans le vide, électrostatique, mécanique

I) Milieux diélectriques

1) *Charges libres, charges liées* : charges libres dans les conducteurs, qui justement conduisent le courant. Mais pour les isolants, il n'y a que des charges liées. Elles impliquent quand même des effets en réponses aux champs électromagnétiques, mais de façon différentes. Exemple du condensateur à la Feynman, présentation heuristique. Caractère diélectrique universel, il est juste souvent très minoritaire en comparaison des effets de conduction, c'est pour cela qu'on s'y intéresse surtout pour les isolants.

2) *Vecteur polarisation* : Sous l'action d'un champ électrique, les charges se déplacent, comme on l'a vu dans le point précédent, et on a donc des dipôles qui se créent. Par exemple, déplacement noyaux et centre du nuage électronique, mais il y en a d'autre, évoquer électronique, ionique, d'orientation. De manière générale, on décrit cela par le vecteur polarisation. On suppose pas de charge libre, et pas de propriétés magnétiques particulières. Définition de la polarisation, OdG , lien avec les densités de charges et de courants liés. Ces quantités vérifient bien la conservation de la charge, c'est rassurant.

3) *Susceptibilité diélectrique* : présentation, ainsi que la perméabilité diélectrique. Cas particuliers. Cas du diélectrique LHI, mais ce n'est pas forcément le cas.

II) Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

1) *Équation de propagation* : blablabla, résolution, on voit apparaître la perméabilité ou la susceptibilité diélectrique. Écrire l'équation d'onde avec les deux.

2) *Relation de dispersion* : la donner, avec les deux formes (cf ligne du dessus), on note que le vecteur d'onde est à priori un complexe quelconque. Partie imaginaire et réelle, sens physique, écriture de l'exponentielle, etc ... Vitesse de phase, longueur d'atténuation, cas particulier.

3) *Indice optique* : ici il est complexe, noter indice de réfraction et indice d'absorption. Cas où on a seulement de la réfraction, cela permet de trouver l'indice du matériaux à partir de l'électromagnétisme et de la mécanique, s'extasier devant la puissance de la physique. Mais c'est normal, car en fait le changement de la vitesse est du à l'interaction de l'onde avec le milieu, milieu qui lui-même ré-émet des ondes ; tout cela est pris en même temps en compte dans l'équation de dispersion.

4) *Énergétique* : énergie, vecteur de Poynting, etc ...

III) Susceptibilité diélectrique

Remarque : bien appuyer sur le fait qu'on va utiliser les équations de la mécanique et de l'électromagnétisme pour décrire la physique des ondes lumineuses, par exemple. Physique très complète et profonde, c'est beau. L'arrivée à l'équation d'onde fera qu'on aura pris en compte l'action des ondes sur la matière, puis la création d'onde par la matière, et qu'on aura remis le tout ensemble

1) *Modèle de l'électron élastiquement lié* : bien présenter l'ensemble des hypothèses et des termes, dire qu'en prenant seulement certains termes choisis avec soin, on modélise plein de matériaux différents.

2) *Susceptibilité électronique* : l'obtenir, faire un joli graphe, etc ...

3) *Susceptibilité d'un matériaux* : rajouter les différentes susceptibilités, et notamment celle d'orientation, qu'on ne décrit que heuristiquement ; bien préciser que celle-ci ne suit plus à haute fréquence. Présenter celle de l'eau, donner la forme générale de la susceptibilité des matériaux, présenter des ordres de grandeurs à la pelle.

4) *Indice optique* : loin des pulsations de résonances, on obtient la loi de Cauchy en faisant un DL. Dire ce qu'il se passe lorsqu'on est aux pulsations de résonance, grosse absorption, etc ... , à très basse fréquence, arrivée au statique, ne pas épiloguer dessus, ce n'est pas forcément le sujet de leçon.

*5) *Biréfringence* : on a déjà les outils pour comprendre la biréfringence, en petite ouverture. Indice optique différent sur deux axes, présenter seulement des lames à face parallèle, explication du polaroid ou de la rotation de la direction de polarisation. Conclure sur le fait qu'on a bien compris la généralité de tout ce qu'on a fait ci-dessus, et qu'on peut l'utiliser pour faire des choses exotiques.

Commentaire : S'appuyer sur la beauté et la complétude de la physique nécessaire pour démontrer la loi de Cauchy, c'est en soi un résultat vraiment magnifique !

LP 29 : Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs

Bibliographie : Dunod Tout-en-un MP/MP*

Niveau : CPGE MP

Pré-requis : Équations de Maxwell, ondes électromagnétiques, puissance et énergie électromagnétique, formalisme complexe

Introduction : équations de Maxwell dans les conducteurs, on va avoir de courants. Mais on sait que les courants ne sont pas là au repos, et qu'ils vont être générés par les champs. Il faut donc commencer par savoir comment les champs créent les courants, et on aura alors des équations fermées avec Maxwell, qu'on pourra résoudre.

I) La conduction dans les métaux

1) *Loi d'Ohm en régime permanent* : introduction du modèle de Drude. Passage par les deux méthodes (celles avec considérations sur les chocs, et celle avec une force de frottement fluide), lien entre les deux, OdG, domaine de validité, terme dissipatif.

2) *Loi d'Ohm en régime variable* : Bien faire les approximations proprement (E ne dépend pas de la position, B négligeable car électron non relativiste), PFD, loi d'Ohm. Limites différentes. R_q sur le déphasage. Terme dissipatif, r_q sur la limite ou il est nul.

3) *Densité de charge dans le conducteur* : MG + Ohm, nul sauf à pulsation plasma, ce qu'on supposera par la suite.

II) Propagation dans un conducteur, généralités

1) *Relation de dispersion* : établir proprement et rapidement.

2) *Forme de la solution* : décomposer l'exponentielle, k complexe, atténuation et dispersivité, rappeler les vitesses de phase et de groupe, et leur signification.

3) *Différents domaines* : domaine ohmique et optique, faire les approximations, expliquer les liens avec l'équation différentielle, faire un joli graphe de la partie réelle et imaginaire de k en fonction de la fréquence. OdG.

III) Domaine Ohmique

1) *Relation de dispersion* : l'obtenir, revenir en réel, équation de diffusion, dire quel terme cela revient à négliger. Irréversibilité.

2) *Forme des champs* : donner la forme des champs, épaisseur de peau, faire un schéma propre (attention, les vitesses de phase sont différentes), atténuation et vitesse de phase qui dépendent de la fréquence.

3) *Effet de peau* : justification du nom, OdG. Cas du métal parfait. Traversée d'une plaque conductrice pour des fréquences différentes. Courant pelliculaires (surfaiques pour le cas du métal parfait), Poynting et énergie dissipée.

IV) Domaine Optique :

1) *Relation de dispersion* : l'obtenir, pulsation plasma. Revenir à l'équation différentielle, Klein-Gordon.

2) *Cas $\omega > \omega_P$* : propagation sans atténuation. Vitesse de phase et de groupe, lien entre les deux, graphique. Dispersivité. Cas limite ou la fréquence tend vers l'infini. Vecteur de Poynting, densité d'énergie électromagnétique, lien avec la vitesse de groupe. Pas d'énergie dissipée.

3) *Cas $\omega < \omega_P$* : atténuation sans propagation, Poynting nul en moyenne, pas d'énergie dissipée. Réflexion totale. OdG : fréquences optiques!

LP 30 : Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique

Bibliographie : Jackson, Tout-en-un Dunod PC/PC* et MP/MP* (les deux!)

Niveau : CPGE PC/MP

Pré-requis : Électromagnétisme : équations de Maxwell, ondes électromagnétiques dans le vide, vecteur de Pointing et énergie électromagnétique, formule des potentiels retardés

Introduction : on a travaillé avec des ondes planes, maintenant on va montrer comment introduire des vrais champs physiques !

I) Le dipôle électrique oscillant

1) *L'approximation du dipôle électrique* : sens physique, introduction, équivalence avec deux charges, avec une charge (la deuxième ne sert en pratique qu'à annuler le champ statique), lien avec une boucle de courant oscillante. Approximation à faire : les trois, équivalence entre deux.

2) *Zone de rayonnement* : définition des trois zones différentes. Zone de rayonnement, OdG.

II) Champ rayonné par un dipôle

1) *Calcul des potentiels* : en faire un seul, proprement. Insister sur le fait que ce sont les approximations faites qui sont importantes, rq sur propagation et polarisation, décroissance en $1/r$.

2) *Calcul des champs* : en faire un seul, proprement. Insister sur le fait que ce sont les approximations faites qui sont importantes.

3) *Structure du champ* : anisotropie, polarisation, structure locale d'onde plane (mais onde non plane!), décroissance en $1/r$. Propagation non dispersive. Diagramme polaire de rayonnement. Seule l'accélération rayonne.

III) Propagation de l'énergie, et puissance rayonnée

1) *Vecteur de Poynting et intensité* : rappel, calcul effectif, anisotropie car dépend de θ . Diagramme polaire de rayonnement.

2) *Puissance totale rayonnée* : intégration sur une sphère. Formule avec la dérivée et avec la pulsation. Explication de la décroissance en $1/r$.

3) *Formule de Larmor* : Expression, se généralise à toute charge accélérée. OdG et exemples : antennes, rayonnement thermique, synchrotron (taille des accélérateurs), Bremstrahlung, diffusion de la lumière.

IV) Diffusion des ondes électromagnétiques

1) *Modèle de l'électron élastiquement lié* : expliquer clairement, et bien poser les approximations. Relier avec le moment dipolaire induit, et donc la diffusion. Présenter proprement les forces. Calcul du moment dipolaire induit.

2) *Puissance rayonnée, diffusion Rayleigh* : calcul de la puissance. Faire les approximations nécessaires et donner les OdG.

3) *Application au bleu du ciel* : faire la manip avec le lait dans la cuve. Expliquer le bleu et le coucher de soleil. Faire un graphe propre pour expliquer la polarisation. La montrer avec le lait.

Commentaire : Le calcul exacte du champ est moins important que les approximations qu'on fait à chaque étape. Il est important de bien les considérer !!

LP 31 : Présentation de l'optique géométrique à partir du principe de Fermat

Bibliographie : Ondes Lumineuses, BFR d'optique, Pérez d'Optique

Niveau : L3

Pré-requis : Optique géométrique, optique physique, électromagnétisme, mécanique Lagrangienne

Remarque : On supposera qu'une première présentation de l'optique géométrique a été faite, et que son utilisation est connue. On se concentrera donc sur sa justification à l'aide du Principe de Fermat, et à voir notamment ce que cela nous apporte de plus que les lois de Descartes

I) Le principe de Fermat

1) *Hypothèses de travail* : on travaille dans un milieu linéaire et isotrope (évoquer en passant la biréfringence), ainsi que transparent. Indice optique, rappel de la définition, et OdG. Il pourra varier, mais alors sur des distances caractéristiques grandes devant la longueur d'onde (sinon diffraction). Toutes les tailles caractéristiques seront de même grandes devant la longueur d'onde

2) *Rayon lumineux* : dans ce cadre, on définit les rayons lumineux comme la trajectoire de l'énergie lumineuse, ce qui revient à prendre les lignes de champ du vecteur de Pointing. On note qu'on ne peut pas isoler un rayon lumineux, cela revient à dire qu'on se place dans les conditions où on n'a pas de diffraction, sinon cette notion disparaît. C'est pour cela qu'on est dans un cadre plus « corpusculaire » d'optique. On peut insister sur le fait que ce n'est pas évident à définir sans passer par l'optique ondulatoire. Noter aussi que ces rayons lumineux ne suivent pas forcément une trajectoire rectiligne ! On suppose qu'ils sont indépendants, mais on voit que cela découle aussi de la connaissance de l'électromagnétisme

3) *Chemin optique* : historiquement, l'expérience a montré que ce n'était pas la longueur du chemin parcouru par la lumière qui avait une importance, mais le temps mis à parcourir ce chemin. On définit pour cela le chemin optique. Petit exemple simple pour montrer sa signification

4) *Principe de Fermat* : énoncé. Dire que c'est une formulation très générale en physique, avec une différentielle sur des variations de chemin ; lien avec le principe de Maupertuis, on peut faire un rapprochement avec la mécanique analytique. Bien insister sur le fait que le chemin soit stationnaire, et pas minimal. Interprétation en optique physique, en considérant que la lumière est envoyée sur toutes les trajectoires possibles. Cependant, les ondes sur des chemins voisins vont toutes interférer destructivement, dû à une rotation rapide de la phase entre des chemins voisins. Cependant, pour le trajet de phase stationnaire, les contributions des chemins voisins vont toutes interférer constructivement, car la variation de la phase est nulle au premier ordre, et on obtient bien la trajectoire réelle (on rappelle encore une fois pour ceux qui ne seraient pas convaincus que les ondes planes n'ont pas d'existence physique !). Éviter de faire un parallèle trop rapide avec l'intégrale de chemin en théorie des champs.

II) Application à des milieux homogènes

1) *Propagation dans un milieu homogène* : c'est une droite. On a aussi le retour inverse de la lumière. Noter que ce n'est en fait que l'écriture du fait que la géodésique d'un espace euclidien homogène et isotrope est une droite.

2) *Interface entre milieux* : Lois de Descartes, démonstration de la réfraction, puis énoncé direct de la réflexion (le travail a en fait déjà été fait).

3) *Lentille et image* : Pour montrer que l'infini converge sur le foyer, cela revient au même de faire la démonstration avec les lois de Descartes, ou de dire que le chemin optique est le même. Lentille plan-convexe, on peut faire la petite application rapide au premier ordre (mais bon, j'ai pas trouvé de référence).

III) Le Théorème de Malus

1) *Surface d'onde* : définition, cas sphérique, plane, lien avec la formation d'image, les rayons parallèles, et les rayons émergeant ou convergeant à partir d'un point.

2) *Théorème de Malus* : énoncé, démonstration, retour sur la formation d'image par les lentilles, importance pour faire le lien entre le vocabulaire de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire.

3) *Lien avec l'optique ondulatoire* : notion de surface d'onde et de surface equi-phase, lien entre le vecteur d'onde et les plans de phase, entre celui-ci et Pointing. On voit donc que Fermat permet de tout redémontrer, puisqu'il donne Malus, et contient donc une partie de l'optique ondulatoire ; tout le lien entre les deux est contenu dans Fermat ! On n'aurait pas eu besoin de l'optique physique pour construire tout ça

dès le début ! (en fait, dans ce cas-là, c'est simplement la définition de rayon lumineux qui est difficile, car on se mord un peu la queue). Rappeler qu'il faut en fait que les variations d'indices soient sur des distances caractéristiques grandes devant les distances caractéristiques de variations du champ et la longueur d'onde. Petite ouverture sur le modèle scalaire de l'optique, mais on n'a pas le temps de s'y attarder (il est mieux de le maîtriser un minimum, car ce modèle est souvent mal compris !).

IV) Interprétation variationnelle

1) *Formulation Lagrangienne et équation des rayons* : on peut faire apparaître par identification le Lagrangien de l'optique, qui s'exprime simplement. On peut alors utiliser Euler-Lagrange pour avoir l'équation des rayons. La décomposer et identifier les différents termes. Noter qu'il sera parfois plus simple d'écrire Euler-Lagrange pour résoudre que revenir à l'équation des rayons (en pratique, il est peut-être plus simple dans le cadre de cette leçon de passer par une écriture infinitésimal de la formulation vectorielle des lois de Descartes, c'est à savoir, et c'est peut-être un choix plus adapté). Première interprétation, la lumière se courbe vers les zones d'indice fort.

2) *Milieux homogènes* : on retrouve la propagation rectiligne. On retrouve aussi les lois de Descartes, mais c'est ici bien plus fort en pratique, puisqu'on n'a pas besoin d'avoir deux points où le rayon passe, mais juste un bout un point et la direction en ce point¹⁴. Fermat peut donc s'écrire en infinitésimal et contient encore plus de choses que ce qu'on a pensé en dérivant les lois des Descartes. Faire sentir qu'on pourrait aussi les démontrer en prenant simplement un rayon incident. C'est trop fort !

3) *Mirages* : faire le début du calcul avec un indice optique en $n = n_0(1 + \alpha * z)$, on se ramène à l'équation de la chaînette ! on connaît alors la solution, on l'a déjà fait en mécanique analytique, on peut avoir les principaux résultats physique : la trajectoire du rayon en fonction des positions des objets, la hauteur géométrique à laquelle on voit l'objet (par dépliement propre du rayon lumineux), etc ... Faire l'expérience de l'eau sucrée (idéalement, on aura mis le sucre au fond au début de la préparation, si possible avec de l'eau chaude pour faciliter la diffusion. Alternativement, on peut utiliser un litre de glycérol, ou de tout autre liquide qui diffuse lentement dans l'eau et qui a un indice optique différent, mais c'est pas sûr que l'on pourra en avoir le jour de l'agrégation). Noter qu'on peut l'avoir aussi avec Descartes en infinitésimal, mais c'est normal car c'est l'écriture en mode noob de l'équation des rayons.

4) *on se fait plaisir jusqu'à la fin des 50 minutes* : réfraction atmosphérique, fibre à gradient d'indice, etc ...

Conclusion : avec le principe de Fermat, on retrouve bien les lois de Descartes, mais on peut aussi résoudre proprement des problèmes bien plus compliqués, et on obtient aussi des considérations très profondes sur le lien avec les ondes et les rayons lumineux, et sur l'interprétation corpusculaire (comprendre ici avec des tirs de rayons) et ondulatoire de la lumière.

Remarque : Tout ceux qui ont fait un peu d'ondulatoire ou d'optique physique sont parfaitement conscients du lien entre les tailles caractéristiques dans l'espace réel et de Fourier, avec la relation "à la Heisenberg" qui découle directement des propriétés de la transformée de Fourier. Mais il ne faut pas oublier qu'on a aussi des relations souvent simples à utiliser via l'équation d'onde, et donc la relation de dispersion. Par exemple, en optique, on peut s'interroger sur la possibilité d'un faisceau lumineux d'équation $A(\vec{r}, t) = A_0(x, y) \exp i(k_0 z - \omega t)$ avec A_0 à support borné, et montrer rapidement qu'un tel faisceau est impossible. En effet, si A_0 est à support borné, sa transformée de Fourier est à support infini. Or, une équation d'onde type d'Alembert donne que $k_x^2 + k_y^2 = \omega^2/c^2 - k_0^2$, ce qui est incompatible avec le support infini de la transformée de Fourier de A_0 .

14. En terme d'équation différentielle, c'est la différence entre avoir des CL et des CI, et il est très intéressant en soi de se demander si on peut résoudre simplement avec des CI, plutôt qu'avec des CL qui nécessitent souvent plus d'hypothèses sur le problème.

LP 32 : Interférences à deux ondes en optique

Bibliographie : Tout-en-un 2ème année*, sextant, ondes lumineuses, Pérez d'Optique, etc ... Noter que les calculs pour des fentes et sources larges se trouvent parfois dans les chapitres sur la diffraction.

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis : Physique des ondes, optique géométrique

Remarque : Quand j'avais écrit cette leçon, j'avais prévu de faire la manip avec une lampe à vapeur de mercure, mais niveau temps, ainsi que pour le présenter de façon optimale dans le cadre d'une leçon, il peut être plus adapté d'utiliser un laser, surtout pour ceux qui ne sont pas à l'aise avec les manipulations d'optique physique.

Introduction : On va parler d'interférences en optique, mais on a l'impression d'en voir assez peu dans la vie de tous les jours. Quelles sont en pratique les conditions pour en voir ?

I) Interférence de deux vibrations scalaires sinusoïdales synchrones

1) *Formule des interférences :* présentation des deux amplitudes, amplitude et intensité résultante, formule des interférences, avec cas particulier. C'est caractéristique des interférences à deux ondes, elle sera toujours présente, même si d'autres facteurs le seront aussi. Ordre d'interférence, figure d'interférence. Contraste.

2) *Conditions d'interférences, cas de l'optique :* Superposition des vibrations, modèle scalaire, vibrations synchrone. Très générale à toute interférence d'ondes. Application à l'optique : modèle scalaire, linéarité de Maxwell, ouverture sur le cas où interférences d'ondes vectorielles. Cas non-synchrone, on somme les intensités.

3) *Cohérence, temps de cohérence :* vibrations cohérence, émission cohérentes, modèle avec trains d'ondes. Caractéristique aléatoire de la phase dans chaque train d'onde. Ordre de grandeur des différents temps de cohérence.

4) *Temps caractéristique de détection :* du détecteur, OdG. Interférence observée dans chaque cas. Il faut donc avoir des caractéristiques très spécifiques pour observer des interférences !

II) Cohérences spatiales et temporelles, localisation des franges

1) *Cohérence temporelle :* Nécessité de faire interférer des ondes cohérentes temporellement entre elles, ce qui nécessite une seule source. Deux méthodes : division du front d'onde, division d'amplitude, exemple par trous d'Young et lames semi-réfléchissantes. Limite imposée : différence de marche plus petite que longueur du train d'onde.

2) *Cohérence spatiale :* source étendue spatialement comme sources ponctuelles incohérentes, elles additionnent leur intensités, c'est une contrainte forte. Condition de cohérence spatiale, rigoureuse et approchée. Cas de la division du front d'onde, limitation sur la taille de la source, non-localisation des franges. Cas de la division d'amplitude, localisation (ou non) des franges. Attention, on peut avoir non localisation avec division d'amplitude, si on utilise une source ponctuelle ! Par contre, la division d'amplitude permet l'utilisation d'une source étendue.

3) *Récapitulatif :* faire un petit schéma avec des flèches résumant toutes les conditions précédentes. Commencer par les conditions imposées par la cohérence temporelle, puis si on peut utiliser des sources étendues pour chaque cas, et présenter la localisation des interférences. Remarques sur l'intensité !

III) Un exemple d'interférence à deux ondes : les fentes d'Young

1) *Trous d'Young :* Cas d'une source ponctuelle, présentation, cohérence temporelle, cohérence spatiale, non localisation des franges, formes exactes, formes approchée sur un plan éloigné. Déplacement du point source.

2) *Passage aux fentes d'Young :* permet d'augmenter la luminosité sans perdre la cohérence spatiale sur une direction. Montrer qu'on a bien la condition d'interférence dans le plan, sommer les sources. NB : ne pas parler plus que en le notant qu'on a un sinuscardinal sur le total, du à la largeur finie des fentes ; c'est de la diffraction et ça n'a rien d'intéressant pour la présente leçon Expérience : montrer tout ça avec une lampe à vapeur de mercure, du skill, et au fur et à mesure. Pour commencer la forme des interférences et la non-localisation.

3) *Éclairement par une fente de largeur non-nulle* : De même il faut sommer les intensités. Cohérence spatiale. Faire le calcul en supposant les fentes infiniment fines. Montrer qu'il apparaît un terme en sinus cardinal de contraste. Normal. Cas qualitatif de la première annulation. Expérience : fermeture de la fente, disparition de la figure d'interférence par annulation du contraste. Application : détermination de la taille d'une étoile!

4) *Vibrations non synchrones* : Vibrations de fréquences différentes, on somme les intensités. Expérience : enlever le filtre interférentiel. Calcul sur la raie double. Généralisation qualitative à la transformée de Fourier du spectre, spectro par interférence.

Commentaire : Bien axer sur les conditions d'interférence! Faire les calculs où on rajoute un paramètre indépendamment, sinon c'est la guerre! Noter à chaque fois que le cos est caractéristique des interférences à deux ondes. Pour les profanes, savoir que c'est la fonction d'Airy qui est caractéristique des interférences à ondes multiples!

LP 33 : Interféromètres à division d'amplitude

Bibliographie : Tout-en-un 2ème année*, sextant, ondes lumineuses, Pérez d'Optique, etc ...

Niveau : CPGE 2ème

Pré-requis : Notion de cohérence, Interférence de deux vibrations scalaire, Interférence par division du front d'onde.

I) Interférence par division d'amplitude

1) *Propriété des interférences par division d'amplitude* : propriété très intéressante, c'est de pouvoir utiliser des sources étendues sans perdre la cohérence spatiale, mais on a alors des interférences localisées (bien noter qu'on peut avoir en division d'amplitude des interférences non localisées si on utilise une source ponctuelle). Par la suite, on se restreindra à des sources étendues. Ré-écrire la condition de cohérence spatiale, et montrer que si c'est le même vecteur d'onde, on a bien cohérence spatiale. C'est cool!

2) *Franges d'égale inclinaison* : Principe : $n_0/n/n_0$ avec observation soit en réflexion, soit en transmission, dépendant de comment est faite cette lame. On va observer des rayons de même vecteur d'onde, donc dans l'espace des k , soit à l'infini, et on a bien localisation des franges. Peut être à deux ondes, si l'énergie n'est contenue que dans les deux premières ondes réfléchies ou transmises, ou par onde multiple, si elle est bien répartie. Pour que le contraste soit optimal, il faut que les ondes aient bien la même amplitude, ou en tout cas une amplitude proche, sinon il sera pourri. Chaque matériel est adapté à un type d'interférence, et il faut observer celle qui est adaptée, donner des exemples variés. Explication du nom : frange d'égale inclinaison car même intensité donne même phase donne même angle ; et on a en plus symétrie circulaire ! Il reste juste à calculer le déphasage en fonction de l'angle. Très utilisé en spectro avec des lames connues.

3) *Franges d'égale épaisseur* : Principe, éclairément en incidence quasi-perpendiculaire, lame mince d'épaisseur variable, modélisation de la trajectoire du rayon à travers la lame, localisation des franges sur la lame, observation soit par réflexion soit par transmission. Explication du nom, frange d'égale épaisseur car même intensité donne même phase donne même épaisseur : très utilisé pour obtenir des informations sur la lame. Dans la nature, manip avec transparents (Superposer quelques transparents bien collés les uns aux autres, le tout posé sur une feuille blanche. Si elles sont éclairées de loin, avec une lumière parallèle non concentrée, on peut voir facilement sur les transparents des franges d'égale épaisseur. Si on les montre avec une flex-cam, c'est le jackpot!), bulles de savons, etc ...

4) *Déphasage à la réflexion ou à la transmission d'une lame* : faire le calcul bien proprement là, on ne le fera plus ensuite, prendre des indices $n_0/n/n_0$. Bien le noter. Tout le travail est fait, on peut dérouler.

II) Interféromètre de Michelson

1) *Présentation* : historique, petit kif, etc ...

2) *Montage équivalent* : blablabla

3) *Coin d'air* : frange d'égale épaisseur, le taf est fait, simple DL à l'ordre 1 à faire. Le montrer en live avec une mercure sur le miroir et un filtre vert. Bien expliquer qu'on veut ici observer toute la lame, avec un faisceau le plus parallèle possible, il est donc intéressant de bien vérifier que tout le miroir est bien éclairé.

4) *Lame d'air* : frange d'égale inclinaison, le taf est fait, le montrer en live avec une mercure qui condense sur le miroir et un filtre vert. Faire la calcul du rayon des anneaux, dire si ils rentrent ou sortent en fonction de e . Application, couche anti-reflet (qualitatif, on annule pour un i et un λ donné) Bien préciser qu'on observe ici dans l'espace des vecteurs d'ondes, donc que le fait d'éclairer toute la lame est inutile. On souhaite par contre avoir beaucoup d'angles différents. Il est donc idéal d'éclairer avec un faisceau très convergent (pour avoir beaucoup d'angles) et si possible contenu entièrement sur la surface du miroir (pour maximiser la luminosité).

Remarque : quand j'ai écrit ce plan, j'avais prévu de le faire avec une lampe à vapeur de mercure, après coup, je pense que c'était un peu téméraire, et surtout pas forcément adapté à une présentation en leçon ...

III) Interféromètre de Pérot et Fabry

1) *Présentation* : historique, petit kif, r très grand, on va l'utiliser en transmission, ce sera des franges d'égale inclinaison en ondes multiples.

2) *Figure d'interférence* : calcul de l'intensité transmise, fonction d'Airy caractéristique des interférences à ondes multiples, visualisation des courbes, peut être très piqué!

3) *Filtre interférentiel* : utilisation comme filtre interférentiel, ajout d'un filtre grossier, en montrer un avec la gélatine d'un côté. Facteur de qualité ou finesse, définition.

4) *Spectromètre haute résolution* : comme égale inclinaison, le rayon dépend de la longueur d'onde. Pouvoir de résolution via critère de Rayleigh. On peut jouer sur l'ordre et sur le coefficient de réflexion de la lame. Ordre de grandeur.

Conclusion : ouvrir sur d'autres dispositifs interférométriques à division d'amplitude.

Commentaire : Pour des raisons de temps, j'ai fait le choix de ne pas parler de spectroscopie avec le Michelson, mais une partie est tout à fait rajoutable pour faire de la spectroscopie par transformée de Fourier.

LP 34 : Diffraction de Fraunhofer

Bibliographie : Tout-en-un 2ème année*, sextant, ondes lumineuses, Pérez d'Optique etc ...

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis : Modèle scalaire de la lumière, interférences, Transformée de Fourier

I) La diffraction, première approche

1) *Le phénomène de diffraction* : présentation, caractéristique des ondes de tous types, pas seulement de la lumière. Taille de variation des objets doit être de l'ordre de la longueur d'onde. On ne peut pas « isoler » un rayon de lumière. On pourrait l'étudier avec Maxwell + les CL, mais c'est trop dur en pratique, il va falloir faire autrement.

2) *Le principe de Huygens-Fresnel* : présentation, ne pas oublier les hypothèses (sphérique, synchrone, amplitude, déphasage indépendant du point). On peut tester sur des ondes sphériques, en pratique seulement vrai pour des petits angles et à l'ordre 1, et on trouve bien un terme de déphasage constant (calcul fait initialement par Kirchhoff). Méditer l'exemple de la corde¹⁵, et le fait que « je peux introduire autant de sources fictives que je le souhaite, si les conditions aux limites sont équivalentes, alors la physique sera la même! »

3) *Calcul de la figure de diffraction* : Faire le calcul proprement, en introduisant la transmittance de l'objet diffractant, en donnant quelques exemples : ça va être très compliqué, on va devoir faire des approximations, on va donc se placer dans un cadre très particulier!

II) Diffraction de Fraunhofer

1) *Conditions de Fraunhofer* : les expliciter très proprement, donner ce qui se passe sur le calcul, faire des OdG pour estimer ce que veut dire « à l'infini ». Formule de Fraunhofer sous incidence normale. Rappeler que pour l'instant, on a fait seulement de la physique ondulatoire, et que c'est très général. Donner la formule pour une incidence non normale, et expliquer qu'en pratique on a juste décalage du centre sur l'optique géométrique. Comme c'est une transformée de Fourier, on a une bijection entre la transmittance et la figure de diffraction.

2) *Réalisation expérimentale* : avec une source quasi-ponctuelle, montage à deux lentille, montage équivalent à une lentille. Avec un laser. Rappeler la bijection qui donne la position sur l'écran en fonction du vecteur d'onde.

III) Diffraction de motifs simples

1) *Fente rectangulaire* : faire le calcul en entier, bien proprement. Les deux directions différentes sont indépendantes, on va se restreindre à une seule direction.

2) *Fente infiniment longue* : dire ce que veut dire infiniment longue. On peut se ramener à une TF plus simple, qu'on peut étudier. Fonction de l'écran, et de l'angle. Première annulation, dire ce qui se passe dans les deux cas limites, remarquer le caractère fondamental du rapport entre la longueur d'onde et la taille caractéristique de l'objet diffractant. Caractéristique des franges, frange centrale, remarque énergétique. Interprétation géométrique des extrema¹⁶. MANIP : la faire avec une lampe à vapeur de mercure. Montrer l'effet de l'ouverture de la fente.

3) *Diffraction par une pupille circulaire* : de même, montrer que c'est proche, sans perdre de temps. Le faire avec un laser, montrer l'effet de l'ouverture de la pupille. Toujours présent, exemple de la lentille,

15. Supposons qu'une corde attachée à une extrémité se voit imposer un mouvement de vibration très complexe par un premier opérateur. Un deuxième opérateur peut alors se mettre entre le premier opérateur et l'extrémité attachée, mettre ses doigts sur la corde et la suivre exactement. Comme il a toujours un mouvement nul vis à vis de la corde, il n'exerce aucun travail sur celle-ci. Cependant, si un observateur ne voit que l'extrémité attachée et le deuxième opérateur, il pourra considérer que c'est celui-ci qui impose son mouvement à la corde et effectue du travail sur celle-ci, et il retrouvera exactement la même physique. Or, cet opérateur peut être là, ou seulement fictif, et le problème n'en est pas modifié!

16. Maximum pour un angle nul, où tout les rayons sont en phase. Minimum quand le faisceau peut être séparé en deux faisceaux, chacun entre le centre de la fente et une extrémité, chacun des faisceaux ayant un front d'onde similaire mais décalé d'une demie longueur d'onde en différence de marche. De même, maximum suivant quand on peut diviser en trois faisceaux, le premier annulant le deuxième, et le troisième restant entièrement, etc... On notera d'ailleurs que cette méthode peut être généralisée sans souci à beaucoup de dispositifs diffractant ; par exemple pour un réseau à N trous, quand il y a une différence de marche d'une demie longueur d'onde entre le trou 1 et $N/2$, toutes les ondes s'annulent par paires, et on retrouve le premier minimum.

qui diffracte sur sa monture circulaire, avec toujours une tache d'Airy, ordre de grandeur, application à une appareil photo numérique.

4) *Propriétés générales des figures de diffraction* : Tache centrale lumineuse, beaucoup plus qu'annexes, largeur de la tache centrale en λ sur taille caractéristique de l'objet diffractant, centré sur l'image géométrique, transmittance réelle donne figure à centre de symétrie.

IV) Utilisation des propriétés de la transformée de Fourier

Idée générale : les propriétés de la transformée de Fourier vont nous permettre d'avoir rapidement plein de motifs plus compliqués, avec simplement une connaissance des figures de diffraction des quelques motifs simples.

1) *Propriété du produit de convolution* : définir, propriété, donner des exemples avec simplement des delta et des peignes de Dirac. Donner les transformées de Fourier de base.

2) *Diffraction par une fente double* : le faire très graphiquement, on retrouve bien les fentes d'Young, c'est cool.

3) *Diffraction par un réseau infini* : présentation rapide du réseau, résolution par Fourier, cool!

Commentaire : Un peu long, attention au temps. Au pire la dernière partie peut être faite très rapidement.

LP 35 : Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique

Bibliographie : Tout-en-un 2ème année*, sextant, ondes lumineuses, Pérez d'Optique etc ...

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis : Optique ondulatoire

I) Diffraction par une superposition de motifs identiques/jumeaux

1) *Transmittance du système* : On définit le motif par sa transmittance, qu'on donne comme une fonction d'un point courant vis à vis d'une position centrale. En pratique, on aura comme transmittance totale un grand nombre de ces motifs, avec le repérage du point central de ceux-ci qui va changer. Écriture sous forme de somme, et sous forme de produit de convolution, avec une somme de Dirac pour décrire les positions centrales.

2) *Amplitude et intensité diffractées* : calcul de l'amplitude par formule de Fraunhofer, identification facteur de forme, facteur de structure. De même pour l'intensité. Bien appuyer sur le fait que les facteurs apparaissent de façon indépendantes dans la figure de diffraction; je peux recueillir si nécessaire l'information sur la forme ou sur la structure indépendamment.

3) *Diffraction et transformée de Fourier* : redonner la propriété de produit de convolution pris avec la transformée de Fourier. Réinterprétation des facteurs de forme et de structure par la transformée de Fourier. Utilité de la somme de Dirac. Petit rappel des propriétés de Fourier, notamment Heisenberg. On étudiera par la suite des structures périodiques et des structures aléatoires.

II) Potentiel dispersif des structures périodiques

1) *Réseau plan* : présentation propre, paramètres pertinents pour la descriptions, transmittance du réseau, par écriture en somme, et par produit de convolution avec un peigne de Dirac. Infiniment long ou pas, fente infiniment fine ou pas.

2) *Diffraction par un réseau* : Utiliser la formule des motifs jumeaux, et faire les transformées de Fourier (on les connaît, en pratique). Montrer que ce n'est que la résolution par Fourier. Figure de diffraction construite pas à pas, interprétation par Fourier, dimensions caractéristiques.

3) *Intérêt dispersif* : sépare les longueurs d'onde différentes, pouvoir dispersif, quels sont les paramètres influençant, recouvrement des ordre 2 et 3. Noter qu'en pratique, seul le facteur de structure est utile, on se moque du facteur de forme, et il apparaît très peu. On a pris ici une porte, on aurait pu prendre n'importe quoi tant que la dimension caractéristique reste la même. Construction des réseaux en pratique, petit kif sur Michelson et son prix Nobel.

4) *Application à la spectroscopie* : présentation du monochromateur, être très intuitif, ne pas s'y éterniser, parler de réseau blasé.

5)* *Intérêt pour l'émission d'onde* : type sonar, au lieu d'envoyer par un rayon incident qui est décalé par rapport à la normal, il suffit de mettre un déphasage constant sur chaque objet du réseau. Cela revient exactement au même. Exemple du sonar et de l'échographie. Transition : on a utilisé la répartition périodique d'un motif pour étudier la lumière, on peut aussi utiliser cela pour étudier la matière par la lumière.

III) Étude de la matière par la diffraction

1) *Motifs identiques et répartition aléatoire* : Lycopode, évoquer le résultat pour l'amplitude et l'intensité. Dire qu'ici la répartition est aléatoire, et qu'on s'en moque. On peut ne s'intéresser qu'au facteur de forme, et c'est l'intérêt. Petite manip pour le kif.

2) *Motif identique sur un réseau 3D* : ici il faut regarder en 3D contrairement au réseau, on regarde sur des plans différents. Là encore, on peut séparer le facteur de forme du facteur de structure, en fonction de ce qu'on veut étudier. Ici on s'intéressera au facteur de structure. Très adapté pour l'étude des cristaux.

3) *Quelles ondes pour sonder la matière* : Dépend de l'échelle caractéristique de ce qu'on veut étudier; par des électrons, des neutrons, des rayons X. Longueur d'onde de De Broglie. Expérience de la diffraction par du graphite, explication.

LP 36 : Absorption et émission de la lumière

Bibliographie : Cagnac de physique atomique, Pérez de Mécanique Quantique

Niveau : 1ère ES

Pré-requis : Thermodynamique (notamment rayonnement d'équilibre), mécanique et électromagnétisme (notamment modèle de l'électron élastiquement lié), mécanique quantique et physique statistique, optique physique

I) Phénomènes d'absorption et d'émission

1) *Spectres optiques* : spectres d'émission et d'absorption. On a les spectres thermiques, par matériaux portés à haute température (pour que ça soit dans le visible), dépend de la température, et légèrement du matériau utilisé (tout n'est pas corps noir!), émission par rayonnement d'accélération. Et spectres de raies, en absorption ou émission, obtenus par des gaz ionisés, notamment dans des sources lumineuses à décharges. On a déjà étudié en thermodynamique statistique le corps noir, nous n'y reviendrons plus, mais on a vu son importance dans la physique. Il nous sera utile par la suite. Pour parler d'émission et absorption, on a par exemple spectre de l'hydrogène, avec différentes raies, par la suite, on étudiera des spectres pour un objet à deux niveaux.

2) *Absorption* : pour commencer, absorption seulement de photons qui ont une énergie correspondante à la différence entre les deux niveaux. Introduction par notion de section efficace, qu'on a déjà rencontré en mécanique ; ici pas de sphères dures, mais on généralise (donner directement les résultats, on n'a pas le temps de lécher de la neige). On arrive à la probabilité d'excitation par unité de temps. *Généralisation à la largeur des raies, approximation de la « broad line »*, introduction du coefficient B12.

3) *Émission spontanée* : probabilité d'émission, bien noter l'hypothèse statistique. Loi exponentielle, donc sans vieillissement, lien avec la radioactivité (mais rapide alors, juste pour te faire plaisir), introduction du coefficient A21. Petit blabla sur mesure expérimentale. Comparaison avec la théorie classique du rayonnement, remarque sur le caractère statistique du vrai rayonnement, et sur la dualité onde corpuscule.

4) *Émission induite* : nécessité, sans elle on ne peut pas retrouver le rayonnement d'équilibre, historique, Albert. Pour comprendre, petit blabla sur l'électron élastiquement lié. Introduction du coefficient B21. Caractéristique de l'onde induite : petit retour sur le modèle de l'électron élastiquement lié si l'envie nous en prend.

II) Bilans radiatifs, relations d'Einstein

1) *Bilan radiatif* : écrire le bilan sur le nombre d'atome dans chaque état, bien noter la conservation du nombre d'atome. Écriture de l'équilibre dynamique, retour sur les hypothèses.

2) *Relations d'Einstein* : on suppose équilibre thermique à une température donnée, et rayonnement d'équilibre. Répartition de Boltzmann, température qui tend vers l'infini, sens physique. Utilisation de la loi de Planck, on la retrouve bien, caractère indispensable de l'émission induite, deuxième relation d'Einstein. Noter que les coefficients étant intrinsèques au système, on les a calculés grâce à certaines hypothèses, mais le résultat obtenu est valable quelque soit l'état du système. Note sur le calcul par la TQC de ces coefficients, ok!

3) *Émission spontanée vs stimulée* : importance de la densité d'énergie, cas limites. Importance de la fréquence, cas limites. Transition : on veut utiliser les propriétés du rayonnement stimulé pour créer des sources monochromatiques puissantes, et très utiles par toutes leurs propriétés, comment faire ?

III) Les lasers

1) *Principe du laser* : obtenir principalement de l'émission stimulée, signification du terme laser. Note sur la dépendance en fréquence du rapport entre émission stimulée et spontanée. On comprend pourquoi les maser ont été développés avant les laser. On va voir comment faire un laser.

2) *Condition d'amplification de l'onde* : l'écrire, on arrive à une situation nécessairement hors d'équilibre. Température négative, mais ne pas s'éterniser, ce n'est pas très important. On a donc besoin de réaliser une inversion de population!

3) *Inversion de population* : évoquer quelques méthodes, sans trop entrer dans les détails, développer le pompage optique d'une transition optique, nécessité d'un système à plus de deux niveaux.

4) *Cavité résonnante* : dire son intérêt, être rapide, expliquer comment est fait le laser. Calcul du gain et condition d'amplification, utiliser directement les cavités de Pérot et Fabry, monochromaticité.

5) *Propriétés du rayonnement laser* : si le temps le permet, cohérence spatiale, directivité, focalisation, intensité, cohérence temporelle.

Conclusion : ouvrir sur refroidissement laser. Bien se renseigner sur l'utilisation du laser, et glisser quelques petites cacahuètes pour affrioler le jury.

Commentaire : Bien se renseigner sur les questions du refroidissement laser, les largeurs de raie, l'utilité des atomes froids, etc ...

LP 37 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon

Bibliographie : Cagnac de physique atomique, Cohen, une référence à ce niveau pour l'hélicité du photon ?, problème d'un tout-en-un Dunod deuxième année du chapitre OEM dans le vide

Niveau : CE2

Pré-requis : Mécanique quantique, physique statistique, électromagnétisme, mécanique classique

Remarque : Il est important de bien savoir quelles expériences ne sont que des indications de l'existence des photons, et quelles expériences prouvent de manière inéluctable l'existence de ceux-ci !

I) Approche historique de la notion de photon

1) *Loi de Planck* : Donner la densité d'état sans calcul, en ré-explicant en deux secondes avec les mains comment on l'obtient. À présent, si on intègre sans quantifier l'énergie sur chaque fréquence, on n'obtient pas le résultat, on est obligé de quantifier l'énergie dans chaque longueur d'onde, première notion de photon, remarque sur l'apparition de la « constante d'aide » .

2) *Effet photoélectrique* : description rapide : j'éclaire en rouge à 10000W ma plaque, il ne se passe rien, j'éclaire en bleu à 1mW, j'ai apparition de courant ! Descriptif expérimental rapide (se garder pour les questions si nécessaire, mais on n'a pas trop le temps pour ça dans cette leçon), et considération énergétique, deuxième indication que le rayonnement électromagnétique est quantifié.

3) *Transition* : très bien, le rayonnement électromagnétique est quantifié, et on a des photons, si vous voulez, mais quelles sont ses caractéristiques ? Masse, impulsion, énergie, spin, moment cinétique ?

II) Impulsion et énergie du photon

1) *Énergie du photon* : on a la loi de Planck, et on voit que l'énergie est bien quantifiée en quanta $h\nu$. On va supposer que c'est bien le cas par la suite. Densité volumique d'énergie. Par la suite, on travaillera avec des ondes planes dans le vide pour montrer la correspondance. Densité volumique d'énergie, lien entre l'amplitude du champ et la densité volumique de photon à une fréquence donnée.

2) *Quantité de mouvement du photon* : on prend une onde plane qui arrive perpendiculaire à une surface absorbante ou réfléchissante, force de l'onde électromagnétique sur le plan. Si on suppose que ce sont des photons qui arrivent et s'adsorbent ou se réfléchissent, on peut en déduire leur quantité de mouvement. OK.

3) *masse du photon* : si c'est bien ça, la relativité doit aussi marcher, car le mouvement est relativiste (...). blablabla, on obtient alors que la masse est nulle, ok !

4) *Conclusion* : faire un récapitulatif des propriétés obtenues. On voit que le modèle du photon marche bien. Test expérimentaux, ok, citer les comètes, une lampe qu'on allume dans le vide. Noter que toutes les expériences où la pression du champ électromagnétique entraine en jeu peuvent être ré-interprétées sous ce prisme. Notamment le refroidissement laser, avec chocs et effets Doppler, regarder les calculs, mais ne pas les faire ici. Cependant, des fois, comme pour la loi de Planck, quand on regarde des effets purement quantiques, on est bien obligé de passer par les photons ...

5) *Effet Compton* : le faire ou moins rapidement selon le temps qu'il reste, tadaaaa ! Parler du fait qu'on a nécessairement deux photons qui sont créés lors d'une annihilation particule/antiparticule. On note qu'initialement, seule une démonstration corpusculaire fut donnée, mais qu'on peut en se débrouillant bien donner une interprétation seulement classique, avec des effets Doppler relativistes.

III) Moment cinétique et spin du photon

1) *Moment cinétique du photon* : Par calcul du couple exercé sur une lame biréfringente. Ne pas le faire ! Mais donner les principaux résultats. Sachant qu'on connaissait le nombre de photons incident, on revient au moment cinétique d'un photon. Test expérimentaux, ok !

2) *Spin du photon* : par le calcul de Planck, on sait déjà que c'est un boson. Son spin sera donc entier. Étant donné que le champ électromagnétique est un champ vecteur (en fait le potentiel, mais il décrit l'intégralité du champ), on peut en déduire que le spin est 1. Cependant, le fait qu'on ait une masse nulle est un peu plus compliqué, et demande de faire de la TQC, qu'on ne fera pas ici. Mais le moment cinétique devrait pouvoir se calculer ici. Pas de moment nul, car le photon est toujours en mouvement, il reste donc plus ou moins \hbar quand on projette sur la direction du mouvement, qu'on identifie à une polarisation circulaire droite et gauche (les deux états d'hélicité du photon). Rappeler qu'une polarisation transverse

peut être décrite comme la somme de deux polarisations droites et gauches.

IV) Dualité onde-corpuscule, complémentarité

1) *Dualité onde-corpuscule* : récapituler sur transparent ce qu'on a obtenu tout au long de la leçon. Mais alors, onde ou corpuscule, quelle est la bonne description ? On va vu que il y avait du caractère purement corpusculaire (effet Compton, effet photoélectrique), mais il y aussi purement ondulatoire (diffraction), pour ça on peut faire une expérience, diffraction par photons uniques. On obtient arrivée des photons un par un pour former la figure d'interférence.

2) *Complémentarité* : on se place dans la MQ et on peut prendre comme fonction d'onde, à savoir densité de probabilité l'amplitude du champ électrique (faire pour des ondes planes transverses). On obtient alors le bon résultat dans l'explication quantique. Noter que le caractère ondulatoire est très présent à basse énergie/petite fréquence/grande longueur d'onde, et que le caractère corpusculaire est très présent à haute énergie/haute fréquence/petite longueur d'onde (même si de manière générale, il faut comparer aux grandeurs caractéristiques du système considéré). Mais alors, comment l'interpréter finalement ?

3) *Modes de vibration du champ électromagnétique* : cf le Cohen, champ qu'on quantifie, on obtient une infinité quantifiée de fréquences, qui tend vers l'infini pour un grand volume, d'oscillateurs harmoniques découplés. On peut alors faire une seconde quantification, et on voit que les photons sont des excitations fondamentales des modes de vibration du champ électromagnétique (ne pas faire le calcul, cf oscillateur harmonique). Tadaaaa !

Commentaire : Bien garder à l'esprit que si on veut faire une vraie description propre des champs quantiques et des caractéristiques fondamentales du photon, un passage par la théorie quantique des champs est incontournable, même si il n'est pas question de le faire ici !

Commentaire : Il est aussi possible de faire une étude thermodynamique du rayonnement électromagnétique comme un gaz de photon. On peut alors retrouver à peu près toutes ses caractéristiques partant par exemple de $u = \sigma T^4$. Cf le Diu.

LP 38 : Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d'onde

Bibliographie : Cohen, d'autres livres de mécanique quantique

Niveau : CM1

Pré-requis : Mécanique classique, optique ondulatoire

Remarque : (faites sonner la cloche!!) On notera que pendant toute cette leçon, on ne s'évertuera pas à simplement développer le formalisme ondulatoire de la matière, mais qu'on appuiera aussi à chaque pas sur les différences fondamentales entre la mécanique quantique et la mécanique classique!

Remarque : Je ne le précise évidemment pas à chaque fois par la suite, mais on va tout faire en 1D

I) Ondes de matière

1) *Approche historique* : Originellement, la notion a été développée pour la première fois par De Broglie quand on tentait de comprendre la structure de l'atome. Plutôt que de chercher à donner des conditions strictes sur les orbites des électrons, il voulait les voir comme des ondes dont les conditions de stationnarité imposeraient la quantification. Ces ondes, nommées ondes de matières, vérifieraient la relation dite de De Broglie. Lien avec la relation de Planck-Einstein qu'on a dérivée de l'étude du rayonnement d'équilibre. Premiers ordres de grandeur. Mais si c'est le cas, on pourrait faire des interférences avec!

2) *Diffraction de particules* : expérience de diffraction des électrons, on voit que ça marche. Ordre de grandeur de la longueur d'onde de De Broglie pour que ça puisse diffracter, on retrouve bien la condition de diffraction. Fentes d'Young, passage aux électrons uniques, problème! On ne peut séparer l'approche corpusculaire de l'approche ondulatoire.

3) *Fonction d'onde* : Introduction de fonction d'onde, explication en tant que densité de probabilité, constante de normalisation. Grande différence avec la description classique, perte de la notion de trajectoire, notamment via l'électron qui passe par les deux fentes à la fois. On note qu'on revient bien à la description classique de la trajectoire si la longueur d'onde de De Broglie est plus petite que la taille de la particule. Noter que cette fonction d'onde est a priori complexe, en fait c'est une nécessité en mécanique quantique. Unité de cette fonction d'onde.

4) *Équation de Schrödinger* : Reste à écrire une équation d'évolution. On postule que dans un potentiel quelconque, la dynamique d'une particule est régie par cette équation. On ne va pas la démontrer ici, mais on va la supposer. Propriétés : linéaire, homogène, principe de superposition et effets ondulatoires, premier ordre par rapport au temps, donc déterministe pour des CI données.

II) Description et évolution de particules libres

1) *Solution en onde plane* : on voit que l'onde plane est solution. Elle a un vecteur d'onde fixé, et donc une impulsion fixée. Cependant, non normalisable, problème. Il va falloir ressortir les fameux paquets d'onde. On note cependant que c'est dommage, car on avait une onde d'impulsion fixée, mais qu'elle est cependant présente dans tout l'espace.

2) *Paquet d'onde, densité de probabilité en impulsion* : on prend un paquet d'onde pour décrire une particule localisée, avec sa transformée de Fourier qui est localisée dans l'espace des impulsion. Relation entre la largeur des deux paquets. Notion d'impulsion d'une particule, avec densité de probabilité en impulsion qui est liée à la transformée de Fourier de la fonction spatiale.

3) *Principe d'incertitude de Heisenberg* : on voit que par le fait même que la position et l'impulsion sont TF l'une de l'autre, on a une condition minimale sur le produit des deux largeurs. En fait, c'est vrai de manière générale. Je ne peux localiser avec précision en p d'autant moins que j'ai localisé avec précision en x . Cas où la position ou l'impulsion sont exactes : problème. Retour sur la localisation d'une particule, avec approche heuristique de la projection quantique. Bien préciser que c'est l'impulsion, pas la vitesse, donc dans le cas où la masse est très grande, cf retour au classique, on retrouve la description classique.

4) *Évolution du paquet d'onde* : blabla, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion du paquet d'onde, analogie classique quand le pic est très piqué, mais sinon c'est différent, ok ...

III) Évolution dans un potentiel scalaire indépendant du temps

1) *Recherche de solutions stationnaires* : séparation des variables en temps et espace, blabla, Schrödinger stationnaire, on va pouvoir résoudre facilement. Bien noter qu'un état stationnaire a une énergie

donnée. Solution en superposition d'états stationnaires. Déjà, ça va être bizarre, parce qu'on va étudier des ondes de matière, donc des particules, et on va avoir une description ondulatoire Oo.

2) *Discontinuité de potentiel* : justifier la discontinuité comme une variation brusque, cas classique (il suffit d'intégrer), cas quantique, notion de longueur caractéristique par la longueur d'onde de la particule. Démontrer la continuité de la fonction d'onde et de ses dérivées, ok.

3) *Puits de potentiel* : Résolution classique, des rebonds de gauche à droite. Écrire l'ED sur les deux zones, on va avoir des exponentielles imaginaires et réelles, analogies avec l'optique, ok. Pas de résolution ici, dessin des solutions en expliquant avec les mains le raccordement. On voit que ça ne ressemble pas du tout au cas classique, on a des ondes stationnaires : selon le mode choisi, il peut y avoir des zones où il n'y a pas du tout de matière Oo! Note sur la quantification de l'énergie, on retrouve bien une notion de quantification, ok. Lien avec la quantification de l'électron. Selon le temps, le puits infini peut être fait, juste pour le plaisir. Énergie beaucoup plus grande que l'énergie du trou, on peut avoir des réflexions, absurde d'un point de vue classique Oo.

4) *Barrière de potentiel* : de même, on a une petite onde évanescence, blablabla, barrière suffisamment courte, la particule peut passer de l'autre côté, effet Tunnel Oo Discuter un peu.

LP 39 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie

Bibliographie : Cagnac de physique atomique, Cohen

Niveau : 2de technologique

Pré-requis : Bases de mécanique quantique : fonction d'onde, postulats. Mécanique, étude du problème à deux corps

I) Caractère historique de l'atome d'hydrogène

1) *Atome d'hydrogène* : on a le noyau, l'électron, et une interaction coulombienne entre les deux. Étant donné qu'on a un système de particule, on peut passer au formalisme de la particule réduite, dont on donne directement le résultat. OdG, on prendra la masse réduite pour être exact, mais en pratique on pourra considérer que le noyau est quasiment immobile. Hamiltonien du système.

2) *Approche historique* : on observe des raies spectrales, les citer. Pourquoi les niveaux d'énergie sont-ils confinés? Si on a des trajectoires comme un système à deux corps normal, on doit avoir toutes les trajectoires possibles? Besoin d'une nouvelle théorie.

3) *Modèle de Bohr* : il a quantifié les moments cinétiques, résultats rapides, on voit que l'énergie est aussi quantifiée. Grandeurs caractéristiques qui apparaissent. Mais, modèles plus fins nécessaires ensuite, orbites elliptiques de Sommerfeld, etc... Il fallait une nouvelle théorie, la mécanique quantique, qu'on va utiliser par la suite.

II) Confinement dans un potentiel central

1) *L'atome d'hydrogène, un potentiel central* : blabla, on développe, on obtient bien un potentiel central. En classique, on connaît les différentes trajectoires, les citer, dire que si on est près des positions d'équilibre, on retrouve bien la trajectoire circulaire, lien avec Bohr, mais mouais (...).

2) *Résolution en quantique* : Pour la quantique, c'est un peu plus subtil, il faut vérifier qu'une description avec simplement la variable r est bien adaptée. Pour cela, on vérifie les relations de commutation avec L^2 , L_z et H , on peut alors chercher sur des sous-espaces propres communs. Introduction des harmoniques sphériques, blabla, on arrive à l'étude d'une seule fonction radiale qui dépend des nombres quantiques des harmoniques sphériques. Noter que les harmoniques sphériques seront étudiées en détail un peu plus tard.

3) *Quantification de l'énergie* : Mais on a alors le confinement dans un potentiel, et on sait qu'on va chercher des solutions stationnaires d'énergie fixée, exemple de l'oscillateur harmonique, mais on peut faire n'importe quoi d'autre. C'est très général, on a rien dit de particulier ici. On peut généraliser si le confinement est fait dans un espace donné par des potentiels, par exemple un oscillateur 3D avec une cuvette de potentiel, cela va toujours marcher. Remarque sur le confinement seulement sur certaines directions, on aura des termes discrets sur l'énergie, mais une composante continue. Lien heuristique avec l'atome d'hydrogène, en fait on peut voir l'électron comme une onde de matière stationnaire qui doit revenir en phase après un tour complet, on a bien une analogie avec le puits infini, sauf que ici la taille du puits augmente avec le rayon. On conclut sur la généralité du calcul, on a tenté d'expliquer l'hydrogène, on a des résultats très généraux, et on comprend pourquoi on aura aussi des niveaux d'énergie sur tous les autres atomes, quand des états stables de confinement sont possibles, c'est à dire quand ils peuvent exister (!).

III) Hydrogène, résolution quantique

1) *Méthode de résolution* : introduire les variables adimensionnées, valeur en 0, valeurs asymptotiques, réduction de la forme de la solution. On donne ensuite directement les fonctions radiales.

2) *Nombres quantiques et niveaux d'énergie* : récapitulatif des différents nombres quantiques, introduction de n , niveaux d'énergie, dégénérescence, notation spectroscopique des niveaux. Noter qu'en pratique, c'est normal que Bohr ait réussi. Le théorème de Pi nous donne la dépendance en les différents paramètres, et il a ensuite pris le toy-modèle qui marche. En soi, ce n'est pas compliqué, c'est l'idée de quantifier qui était géniale, et un défi intellectuel pour l'époque.

3) *Fonction d'onde* : donner la dépendance orbitale et radiale des premiers niveaux. Attention, contrairement à une erreur répandue partout, les fonctions d'onde doivent pour être représentées convenablement être exprimées comme le produit des fonctions radiales et des orbitales sphériques; on a tendance à donner une image des orbitales comme la densité de probabilité, mais ce n'est pas suffisant! Les représentations

sont plus compliquées que des jolies lobes, et vraiment dessinables qu'en 2D par le commun des mortels (et surtout sur un tableau). Bien noter aussi que si la densité radiale ne tend pas vers 0 quand le rayon est nul, la probabilité de trouver une particule à rayon proche de 0 tend vers 0 car il faut multiplier par le volume élémentaire. Préférer un dessin de densité électronique à ces lobes assez sournois.

LP 40 : Effet Tunnel

Bibliographie : Cohen, Éléments de physique nucléaire, de Meyerhof, une référence sur le microscope à effet tunnel

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique quantique ondulatoire, équation de Schrödinger, courant de probabilité

I) Modélisation du problème

1) *Présentation du problème :* modélisation par une onde plane, potentiel carré en première approximation, étude 1D.

2) *Analogie classique :* résolution, commentaire.

3) *Équation de Schrödinger :* rappel, application à un domaine de potentiel constant, disjonction des cas $E > V$ et $E < V$.

4) *Discontinuité du potentiel :* calcul par Schrödinger, montrer que tout est bien continu. Cas où la marche devient infinie.

II) Coefficients de réflexion et transmission, effet Tunnel

1) Résolution par les conditions aux limites. Considérations physique. Ne pas faire le calcul et donner les résultats pour l'onde transmise et réfléchie.

2) *Coefficients de réflexion et transmission en probabilité :* justifier sa forme par le courant de proba. Le donner. Remarquer que $T+R=1$. Attention, il est important de noter que si le courant de probabilité a une valeur moyenne qui est donnée, il change au fur et à mesure du temps. Notamment lorsqu'il est nul en moyenne, pour une barrière très large, il oscille au cours du temps, la probabilité "sort" puis "rentre" à intervalle régulier.

3) *Effet Tunnel :* faire le DL pour avoir la forme plus simple à utiliser. Effet tunnel, OdG.

4) *analogie optique :* réflexion totale, mêmes équations donc même physique, considérations énergétiques (à cause de la réflexion à la deuxième discontinuité).

III) Cas d'un potentiel quelconque, application à la radioactivité alpha.

1) *Potentiel quelconque :* technique du découpage en potentiels carrés juxtaposés. Échelle mésoscopique nécessaire. Forme de la solution.

2) *Radioactivité alpha :* historique, présentation du problème, forme du potentiel.

3) *Résolution :* calcul. OdG. Généralisation à d'autres problèmes physique.

IV) Microscope à effet Tunnel

1) *Historique :* idée d'utilisation, développement, très répandu maintenant, montrer une photo.

2) *Concept :* faire un schéma clair, expliquer le fonctionnement.

3) *Caractéristiques techniques :* résolutions sur les différentes directions.

LP 41 : Fission, Fusion

Bibliographie : Luc Valentin, Noyaux et Particules (prendre l'édition récente), Physique Nucléaire, de Le Sech et Ngô, Le nucléaire expliqué par des physiciens, Bernard Bonin, ou tout livre sur la fusion

Niveau : L3

Pré-requis : Notions sur les particules élémentaires (neutrons, protons, électrons, erwanon, ...), description du noyau

Remarque : On ne va pas ici revenir sur une première description du noyau, qui déjà faite, mais on va s'attaquer directement à la compréhension de sa stabilité et de ses états énergétiques, avant de l'appliquer à la fusion et la fission.

I) L'énergie du noyau

1) *Cadre de l'étude :* rappel du noyau, ses composants, liaison par l'interaction nucléaire forte, sa taille, de petits OdG fun, notamment l'énergie de masse d'un proton et d'un neutron. Cependant, quand on les pèse ...

2) *Énergie de liaison :* Introduction par la différence de masse, graphe de son évolution dans les noyaux réels, vallée de stabilité, etc ... Ok c'est cool, mais on voudrait pouvoir décrire cela proprement. Modèle ?

3) *Modèle de la goutte liquide :* Présentation, modèle semi-empirique, présentation de tous les termes, accords avec l'expérience, on comprend plus ou moins ce qui va se passer.

4*) *Modèle en couche et nombres magiques :* l'avoir en tête, il y aura des questions dessus, ce n'est pas bien dur. Mais s'éloigne un peu de la notion de fission-fusion pour être détaillé ici, à mon avis.

II) La fission nucléaire

1) *Principe :* lien avec l'énergie de liaison, donner un ou deux exemples, considérations énergétiques. Quels matériaux peuvent fissionner ? Noyaux fissibles et fertiles, nécessité de l'enrichissement nucléaire.

2) *Principe des réacteurs nucléaires :* Principe de la réaction en chaîne, neutrons et surface efficace, neutrons capturés, neutrons thermiques, modération hautement non-triviale. Coefficient de criticité, neutrons retardés. Expliquer que tout l'art de construire une centrale chez soi est que le coefficient de criticité ne dépasse un que par les neutrons retardés, on peut alors sur des temps caractéristiques décents contrôler une centrale.

3) *Différents types de réacteurs :* les énumérer, nombre, énergie, utilisation selon les pays, ceux adaptés à une utilisation familiale, etc ...

4) *Un exemple de réacteur, les REP :* Blablabla, description, blablabla. OdG : Dans les REP, l'eau est autour de 155 bars et 320°C (!)¹⁷, en pratique on peut voir que c'est un bon compromis pour avoir des grandeurs élevées mais être sûr de tout le temps rester en dessous du point critique de l'eau (374°C et 220 bars) au dessus duquel on ne pourrait plus établir l'équilibre liquide-vapeur.

5) *Risque nucléaire et gestion des déchets :* blablablabla.

III) La fusion nucléaire

1) *Principe :* lien avec l'énergie de liaison, donner un ou deux exemples, considérations énergétiques. Quels matériaux peuvent fusionner ?

2) *Le soleil :* décrire la fusion dans le soleil, blablablabla, OdG à la main, c'est cool, etc ...

3) *Les étoiles :* mais, que se passe-t-il quand plus d'hydrogène ? Contraction, flash alpha, suite de fusions différente, arrivée au fer, supernovæet autres. Cray sur la poussière d'étoile. Nucléosynthèse primordiale.

4) *Vers une fusion contrôlée :* source d'énergie importante, réalisation technologique actuelle.

Commentaire : Cette leçon tient plus de l'étude de documents que d'autre chose, ce qui est d'après moi un peu problématique à l'agrégation ; même si son contenu fait parti du bagage minimal d'un physicien.

17. D'après un ami qui travaille dans une telle centrale, si quelqu'un passe en courant devant un tuyau percé qui contient de l'eau dans de telles conditions (la vapeur d'eau est invisible), il est littéralement coupé en deux...

LP 42 : Oscillateur à deux degrés de liberté en mécanique classique et en mécanique quantique

Bibliographie : Cohen, Pérez de mécanique

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique quantique, fonction d'ondes, postulats, formalisme de Dirac, représentation position et impulsion, oscillateur harmonique à une dimension

Remarque : On notera une certaine ambiguïté sur le titre de cette leçon. En effet, qu'entend-t-on par oscillateur à deux degrés de liberté ? Pour le système classique, c'est simple, mais pour le système quantique, c'est moins évident. Est-ce l'analogue quantique de l'oscillateur classique, qu'on obtient en quantifiant le Hamiltonien par la procédure de quantification canonique, ou bien est-ce les oscillations d'un système à deux niveaux, qui est l'analogue mathématique du système classique (même si le traitement quantique impliquera des différences, bien évidemment). Je fais le choix de prendre ici le système à deux niveaux quantique, en identifiant cela comme un oscillateur entre les deux niveaux possibles, mais on voit que cette définition d'un oscillateur n'est plus vraiment applicable au cas classique alors. Bref, le changement de titre induit quelques pérégrinations dialectiques assez obscures (cf cette phrase) sur le choix du contenu. Nous basant sur le fait qu'après tout, le jury de l'agrégation n'est pas tout à fait inconscient du contenu probable d'une leçon, nous choisirons le système à deux niveaux, qui permet une discussion physique plus complète et intéressante, en tout cas dans la comparaison du cas classique et quantique.

I) Oscillateur à deux degrés de liberté en mécanique classique

1) *Définition du système :* On pense d'office aux pendules couplés par torsion, ou aux masses fixées par des ressorts couplées elles-mêmes par un ressort. Écriture des équations dynamiques, on voit bien que c'est la même chose. En pratique, on peut faire une analogie à quelque chose de très général en physique, avec une considération énergétique, et deux coordonnées. On a vu qu'en 1D, on avait assez près du minimum un développement en oscillateur harmonique, ici c'est la même chose avec une cuvette de potentielle, dont on donne la forme générale. Cela revient bien aux mêmes équations du mouvement, et c'est en pratique très général en physique. Noter qu'on pourrait penser à développer sur deux oscillateurs harmoniques indépendants dès le début, mais que ce n'est en fait pas possible avec les coordonnées « naturelles » qu'on utilise pour décrire a priori le système. C'est en fait là qu'est tout le problème. Pour la suite, on prendra pour ne pas se perdre dans des calculs trop lourds une cuvette symétrique sur les deux oscillateurs, à savoir deux oscillateurs semblables couplés, mais ce n'est pas forcément le cas, et on donnera ce qui se passe de façon descriptive quand une dissymétrie est introduite.

2) *Modes propres :* On a le système d'ED, il sera plus simple de le décrire en cherchant à le diagonaliser, ce qui revient à chercher les modes propres. Ici, on se place dans le cas d'oscillateurs symétriques, résolution à vue, nouvelles équations avec ces modes propres, oscillateurs harmoniques, pulsations propres, considérations physiques sur les modes, les montrer avec les pendules couplés. Sens physique des ces modes propres, vibration collective.

3) *Solution générale, battements :* On a solution générale comme somme des deux modes propres, dont les amplitudes sont données par les conditions initiales. Cas où initialement un des oscillateurs est au repos, et l'autre non. Battements entre les modes. Lien avec le terme de battement, effet d'écart des pulsations. Cas non symétrique, on a bien des battements, mais avec un minimum non nul.

4) *Considération énergétique :* Rappeler que pour des oscillateurs harmonique, l'énergie totale est proportionnelle à l'amplitude des oscillations. On peut supposer cela si les oscillations sont modulées en amplitude suffisamment lentement. On voit donc qu'ici on a un transfert d'énergie entre les deux oscillateurs. Lien entre l'efficacité du transfert et, d'une part la similitude des deux oscillateurs, d'autre part le terme de couplage.

II) Système à deux niveaux, modes propres quantique

1) *Présentation du problème :* système physique avec un espace de dimension 2, état propre du système sans couplage, écriture du couplage. Donner dès maintenant des exemples physiques de tels systèmes, notamment ceux qu'on étudiera dans le 4). Lien avec la description classique, dire que ce n'est plus du tout le même système, mais que c'est l'analogue quantique. Encore une fois, on est passé par une

introduction sans le couplage, mais il était toujours là, le problème de la description en variables naturelles et en variables utiles pour décrire le système revient encore.

2) *Énergies propres* : on diagonalise le Hamiltonien. En fait, on voit qu'il y avait une grande analogie entre le Hamiltonien et le système d'équations différentielles en classique, c'est normal. On obtient les deux énergies propres et on peut revenir aux états propres

3) *Effet du couplage sur les niveaux énergétiques* : deux énergies en fonction du couplage, faire un joli graphe, donner l'effet de l'éloignement et du rapprochement des niveaux.. Bien noter qu'il y a une stabilisation énergétique. Dans le cas général, noter aussi que la déstabilisation est toujours plus grande que la stabilisation (on ne peut pas niquer la physique), c'est presque une loi de modération.

4) *États propre, stabilisation énergétique* : les donner, exemple avec la molécule H_2^+ , parler de stabilisation énergétique. Sens physique véritable, en pratique c'est lui qu'on va trouver, ce qui est un peu différent du cas classique, mais tout est question de comment on décrit le système. Parler du benzène. Bien retenir qu'«un couplage entre niveaux permet une stabilisation énergétique», et que c'est d'autant plus marqué que les systèmes sont proches en énergie, et que le couplage est important.

III) Dynamique du système quantique

1) *Évolution temporelle* : on écrit l'évolution temporelle, passage par les modes propres, on a alors des oscillations.

2) *Oscillation entre les modes* : formule des oscillations de Rabi, analogie au cas classique, sauf que c'était un passage d'énergie, qui était réel, et que là on a un passage de probabilité. Effet d'un éloignement des niveaux d'énergie, et d'une augmentation du couplage. Ne pas épiloguer sur le fait que l'oscillateur classique oscille, ce qui est en fait du à l'analogie inexacte, en fait il faut s'appuyer juste sur l'énergie qu'il contient, et donc l'amplitude de ses oscillations pour faire quelque chose de propre. Par contre, une différence fondamentale est que comme c'est une probabilité quantique, on peut utiliser la mesure quantique pour faire des changements. Typiquement, on peut le laisser dans un état en le mesurant sans cesse avec un temps caractéristique petit devant celui des oscillations de Rabi.

3) *Exemple d'oscillations entre deux états* : H_2^+ et moment dipolaire, molécule d'ammoniac, etc ... Effet physique d'une telle superposition dynamique d'états.

Commentaire : On sera triste de considérer qu'en fait la plupart des différences sont dues au fait que les systèmes ne sont pas les mêmes, et pas à une différence entre la mécanique quantique et classique et quantique, car les analogies mathématiques sont proches d'être exactes. On appuiera donc notamment sur le phénomène de mesure quantique, qui fait différer les problèmes, et sur les effets qui apparaissent de ces oscillations en mécanique quantique. Mais en soit, seul le phénomène de mesure quantique met en évidence la différence quantique/classique, le fait que ce soit une densité de probabilité ne jouant pas vraiment, car de toute façon les systèmes étudiés ne sont pas les mêmes ...

LP 43 : La molécule : stabilité, énergie

Bibliographie : Cohen, les deux tomes, notamment le complément du tome 2 « exemple simple de liaison chimique, l'ion H_2^+ » qu'il faudra simplifier, Tout-en-un de chimie PCSI et PC/PC*

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique quantique, dont outils mathématiques, concept de fonction d'onde, bra et ket, atome d'hydrogène et orbitales atomiques. Notions de base de chimie, modèle de Lewis

Remarque : Pour une raison obscure, l'ensemble de la littérature note « l'Hamiltonien », ce qui à mon sens est impropre, la vraie écriture devant être « le Hamiltonien ». Luttons ensemble contre cette hérésie !

Introduction : On a dans le cours de mécanique quantique résolu le problème des orbitales électroniques des atomes, de manière exacte ou approchée. Cependant, pour avoir une bonne compréhension du monde qui nous entoure, il faudrait comprendre comment sont liées les molécules, et ce qu'est vraiment la mise en commun d'électron dans les liaisons covalentes. En quoi ces liaisons permettent une stabilisation par rapport aux atomes séparés, et pourquoi certaines liaisons se forment et pas d'autres. On travaillera avec les concepts de la mécanique quantique, et on essaiera donc de comprendre pourquoi la mise en commun d'électrons permet une stabilité supplémentaire.

I) Étude de l'ion H_2^+

1) *Position du problème* : On a deux noyaux et un électron. Introduire proprement tous les jeux de coordonnées utilisés ! En pratique, il faudrait écrire le Hamiltonien du tout et chercher les états propres, mais ça va être très compliqué. On va commencer par faire l'approximation de Born-Oppenheimer en supposant les noyaux fixes. On note cependant qu'on pourra faire ensuite varier cette distance des noyaux, on la considérera donc comme un paramètre. Présentation du Hamiltonien. Résolution exacte encore impossible, on va choisir une base de ket d'essai sur laquelle on pourra travailler efficacement. Pour cela on prend les limites où l'électron est très proche d'un des noyaux, ce sont les orbitales atomiques que l'on a déjà étudié, forme de cette orbitale, on prend ces deux orbitales comme base. On va chercher une solution stationnaire (en fait c'est l'application de la méthode des variations, en lien avec la minimisation de l'énergie, mais il ne faut pas s'éterniser là-dessus). Évoquer la méthode de la combinaison linéaire d'orbitale atomique (CLOA), mais on y reviendra.

2) *Résolution* : présenter l'équation aux valeurs propres, l'écrire entièrement, puis sous forme d'un déterminant. On va plus qu'à chercher les deux solutions de cette équation du second degré.

3) *Différentes intégrales* : dans cette équation, ce sont différentes intégrales qui apparaissent. On va leur donner un nom, et les étudier un peu plus en détail. On pourrait ici les calculer de manière exacte, mais ce n'est pas le but. Intégrales de recouvrement, intégrale symétrique sur le Hamiltonien, pour la première, bien expliciter chaque terme, et parler de l'effet d'écran. Noter que cette intégrale seule ne suffit pas à expliquer la stabilité. Intégrale antisymétrique sur le Hamiltonien, expression de chaque terme, parler de recouvrement et d'échange, cette intégrale est négative. En analogie avec la suite, et notamment avec les notations du déterminant séculaire par les chimistes, il sera utile de donner des notations propres aux différentes intégrales, pour ne pas avoir à manipuler des termes peu clairs, utiliser S , EH et β .

4) *Orbitales moléculaires* : On commence par résoudre les états propres de l'énergie avec les notations simples, puis on fait de même avec les solutions. Orbitales liante et anti-liante, représenter sur des graphes et avec la densité d'électron, faire un graphe énergétique, stabilisation de l'ion par mise en commun de l'électron, ce qui diminue son niveau d'énergie. Noter que la déstabilisation est plus grande que la stabilisation (comme dit un grand penseur de notre temps : « on ne peut pas niquer la physique »), définir l'indice de liaison. Mais tout cela est bien cool, mais d'où vient la présence d'une distance d'équilibre entre les deux noyaux.

5) *Distance d'équilibre inter-proton* : Pour cela il faut regarder l'énergie de l'ensemble, qui va dépendre de R . On suppose qu'on se place sur le ket liant, et on va faire varier le paramètre distance inter-proton. Bien expliciter ce passage, qui doit être particulièrement clair ! L'énergie totale est la somme de l'intégrale symétrique et antisymétrique du Hamiltonien. Les tracer successivement sur un graphe. Limite en zéro et en l'infini (attention, pour le terme antisymétrique, on obtient trois fois l'énergie de Bohr, si on fait un clin d'œil au fait que ce devrait être l'énergie de l'orbital atomique de l'hélium+, noter que ce devrait être

quatre fois l'énergie de Bohr, ce qui est dû au fait que notre modèle n'est pas exacte à petit rayon). Le tout-en-un PCSI aide à tracer les courbes. Existence d'une distance d'équilibre, tadaaa!!!

Remarque : ici, tout le travail difficile a été fait, à partir de maintenant, il n'y a plus qu'à se laisser guider par les tout-en-un de chimie, et c'est très simple.

II) Généralisation, méthode des CLOA

1) *Approximations de travail* : écriture la plus générale de la fonction d'onde. Très compliqué, on va faire moult approximations. Born-Oppenheimer, approximation monoélectronique, note sur l'antisymétrisation de la fonction d'onde pour satisfaire le principe de Pauli.

2) *Méthode des CLOA* : On écrit chaque fonction d'onde électronique comme somme de toutes les OA qui participent a priori. On écrit alors l'équation aux valeurs propre pour des solutions stationnaires du Hamiltonien, et on calcule. Il y a des méthodes systématiques, mais on peut aussi déjà beaucoup simplifier sur chaque cas, notamment en tenant compte des symétries.

3) *Molécules diatomiques homonucléaires* : On ne prendra que les électrons de valence, et on note que beaucoup d'intégrales d'échanges vont être nulles, dû aux symétries de celles-ci (faire de jolis dessins). On aura juste à prendre en compte assez peu d'échange. On note aussi que seules les orbitales proches en énergie vont interagir. Exemple pour l'oxygène, diagramme décorrélé. On retrouve plein de fois le calcul fait dans le I), considération énergétique sur les liaisons, le fait qu'on ne puisse pas niquer la physique, justification de l'existence de certaines molécules et pas d'autres. Indice de liaison, représentation de Lewis, paramagnétisme : ça marche ! Ouverture sur les diagrammes corrélés.

4) *Analyse expérimentale* : spectroscopie de photoélectron, blablabla, ouverture sur spectroscopie, différentes énergies, ne pas aller trop loin, se préparer à des questions assez pénibles ... Donner beaucoup d'ordres de grandeur des énergies de liaison, c'est très important !

III) Méthode systématique, déterminant séculaire

1) *Hypothèses* : de même que précédemment, dire tout ce qui ressort de la partie précédente, terme d'interaction entre électrons indépendant de l'orbital, c'est le champ moyen.

2) *Déterminant séculaire* : Écriture systématique de la résolution, approximations pour tout les termes du Hamiltonien qui apparaissent, écriture matricielle, résolution par déterminant séculaire. Règles sur le nombre d'OM fonction du nombre d'OA par nombre de solutions. Considérations énergétique, stabilité, ...

3) *Approximation de Hückel* : il n'y aura probablement pas le temps, mais c'est en cadeau. Liaisons doubles de molécules planes, approximations, niveaux d'énergie.

Conclusion : On est parti d'un modèle exacte, on a résolu, on a montré l'existence et la stabilité, les causes énergétiques, et on a vu à la fouine à mesure comment simplifier de plus en plus pour les structures complexes, mais toujours avoir des résultats.

LP 44 : Capacités thermiques : description, interprétation microscopique

Bibliographie : Diu de Thermodynamique et de Physique Statistique.

Niveau : L3 (bien tassée)

Pré-requis : Thermodynamique classique, mécanique classique, mécanique quantique (notamment l'étude de l'oscillateur harmonique), physique statistique (notamment l'utilisation de l'ensemble canonique)

Remarque : Il est bien évident que cette leçon (et en fait de manière générale les grosses leçons de matière condensée, notamment) ne pourra pas être préparée convenablement en 4h sans un minimum de maîtrise des outils utilisés. À défaut d'une telle maîtrise, une préparation raisonnable des calculs faits dans cette leçon est incontournable. Je conseillerais personnellement au début de cette leçon d'identifier les paragraphes utiles des deux livres (une recherche systématique via l'index et la création de marque-pages annotés me semble être une bonne solution), avant de se lancer dans la rédaction de la leçon, qui ne pose plus de problème une fois les paragraphes identifiés.

Remarque : Bien préciser en présentant les pré-requis qu'une première introduction des capacités thermiques et leur utilisation en thermodynamique a déjà été présentée, et que pendant cette leçon on va s'intéresser seulement à leur description et interprétation microscopique.

Remarque : Toutes les courbes à présenter et des tableaux de températures caractéristiques sont dans les documents informatiques à disposition.

Remarque : Il est important de bien comprendre une bonne fois pour toute qu'un oscillateur harmonique à un degré de liberté apporte deux contributions quadratiques au Hamiltonien, et qu'il donnera donc deux fois $1/2*kT$ à l'énergie moyenne dans l'approximation classique.

Introduction : nous permet d'avoir des détails sur la composition microscopique de la matière, et notamment de tester les théories quantiques statistiques.

I) Capacités thermiques

1) *Capacité thermique à volume constant :* définition thermo via U , sens physique, dépendance en variables, généralisation aux corps non purs, extensivité, en phy stat on a bien cette définition avec U qui est l'énergie moyenne. Écrire l'ITF qu'on développe pour arriver à la définition via S , qu'on commente, et qui peut être plus avisée en fonction du contexte de l'étude.

2) *Capacité thermique à volume constant :* De même, définition, H plus adaptée aux transformations mono-P, propriétés, définition par l'entropie de même. On travaillera plutôt à volume constant par la suite, mais cela ne change pas grand chose.

3) *Propriétés générales :* signe, se démontre via la thermo, mais peut se comprendre heuristiquement comme une loi de modération, exemple par un échauffement spontané créé par une fluctuation thermique. (**taunt sur les trous noirs de capacité thermique négative¹⁸ **). Application du principe de Nernst pour démontrer que les capacités tendent vers 0 quand la température tend vers 0. Je fais le choix de ne pas donner la relation de Meyer généralisée donnant le lien entre les deux capacités, cela peut être fait ou non, mais dans tous les cas la regarder en préparation car une question sera forcément posée dessus.

II) Capacités thermique des gaz

1) *Équipartition de l'énergie :* énoncé et démonstration rapide. Prendre des notations les plus condensées et claires possible, pour la démonstration faire apparaître l'intégrale importante, ne pas faire l'IPP car cela n'a que relativement peu d'intérêt. Dire que c'est fondamental et qu'on va beaucoup l'utiliser par la suite, bien appuyer sur les hypothèses.

18. En fait, et de manière très générale, il est tout à fait possible d'avoir des capacités calorifiques négatives pour des objets macroscopiques, sous certaines conditions. En effet, la négativité des dérivées secondes de l'entropie dans les configurations d'équilibre (pour assurer que l'état atteint est bien un maximum de l'entropie) n'assure la positivité des capacités calorifiques que localement. Pour passer du local au global, il est alors nécessaire d'utiliser la propriété d'homogénéité du système. Or, pour des systèmes mettant en jeu des interactions à longue portée, cette homogénéité n'est a priori plus vérifiée ; par exemple les objets auto-gravitant ont souvent une densité plus élevée en leur centre. La contribution potentielle à l'énergie de ces forces à longue portée peut alors induire une capacité calorifique totale négative ; une énergie potentielle d'interaction étant généralement négative quand on la définit égale à 0 dans le régime de liberté asymptotique.

2) *Gaz parfaits* : définitions, dire qu'il y a autant de gaz parfait que de $C_v(T)$, expliquer que comme le gaz est sans interaction, la capacité calorifique donne donc une description de la structure des molécules composant le gaz parfait. Rappel des résultats classiques, GP mono et di atomique, dire qu'on ne va pas faire l'étude à des températures qui tendent vers 0 car les gaz se liquéfient.

3) *Gaz parfait monoatomique* : présentation du Hamiltonien, bien expliquer qu'en fait on n'a pas de structure interne. Équipartition de l'énergie pour avoir directement le résultat voulu. Approximation classique bien validée pour la plupart des gaz à partir de la vaporisation (sinon, on a par exemple l'hélium 3 qui fait un gaz de fermion type électrons de conduction à basse température, avec une température caractéristique de 2,7K).

4) *Oscillateur harmonique quantique* : être TRES rapide. Rappeler Hamiltonien, niveaux d'énergie, fonction de partition pour une particule, énergie, capacité calorifique. Ne pas faire ici les limites de hautes et basses températures.

5) *Gaz parfait diatomique* : On rajoute la structure interne. Ne pas parler de la contribution électronique du Hamiltonien, juste dire qu'il y a vibration et rotation. Commencer par étudier rapidement les vibrations, particule réduite, écart à position d'équilibre et DL de l'énergie potentielle qui donne un oscillateur harmonique. Température caractéristique via l'énergie caractéristique, lien avec la spectroscopie, DL à haute et basse température. Dire rapidement que c'est bien la même chose pour les rotations (modulo l'identification propre des différentes contributions quadratiques du Hamiltonien à prendre en compte), comme on l'a déjà vu en mécanique. On va avoir les mêmes résultats, températures différentes, lien avec la spectroscopie. Présentation de jolies courbes expérimentales et de tableau avec les températures caractéristiques.

6) *Gaz réels* : il faudrait rajouter une contribution supplémentaire due aux interactions, qui serait négative. On n'a pas le temps ici.

III) Capacités thermique des solides

1) *Solides cristallins, modèle d'Einstein* : concept des $3N$ oscillateurs harmonique. Haute température, basses température, donner juste la formule et les ordres de grandeur des températures d'Einstein, les calculs ont déjà été faits. Montrer les courbes expérimentales, et dire que ce n'est pas vérifié.

2) *Vibrations collective du réseau* : On passe à un modèle d'oscillateur couplés, dire que ça a déjà été fait en mécanique, présentation de la relation de dispersion, joli graphe, identification des phonons optiques et acoustiques, dire qu'à basse température il y a toujours des modes à activer, les phonons acoustiques. Faire la calcul avec l'approximation de Debye pour arriver à la capacité thermique à basse température, mais ça semble chaud niveau temps, sinon dire qu'on le verra en TD mais que ça marche bien.

3) *Cas des métaux* : on a en plus un gaz d'électron, mais on ne voit pas sa contribution à haute température alors qu'elle devrait être grande. De plus, à basse température, on a une capacité en T . Introduction du gaz de Fermion, développement à basse température, faire avec des ordres de grandeurs, c'est bien fait dans le Diu, on arrive à un résultat en T , ça marche bien. Température caractéristique très haute, d'où le fait que c'est négligeable à température ambiante, ok. Grand succès de la mécanique quantique !

LP 45 : Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation du champ moyen

Bibliographie : BFR électromagnétisme 4, Diu de physique statistique, Trémollet, Pérez d'électromagnétisme, etc ...

Niveau : L3

Pré-requis : Physique statistique (ensemble canonique), mécanique quantique

I) Le magnétisme dans la matière

1) *Description macroscopique* : aimantation induite, excitation magnétique, champ magnétique, susceptibilité magnétique (attention, pas toujours linéarité). Différents corps dans la nature, diamagnétiques, paramagnétiques, ferromagnétiques, définition macroscopique. Loi de Curie (avoir Curie-Weiss en tête).

2) *Description microscopique* : Bien noter que tout doit s'expliquer au niveau quantique, car pas d'explication classique possible du magnétisme microscopique. Cas où pas de moments magnétiques intrinsèques, c'est le diamagnétisme, effets type inductifs, Lenz, susceptibilité négative, ok. On n'y reviendra plus, et on s'intéressera aux corps qui ont des moments magnétiques microscopiques intrinsèques. Moment magnétique orbital, description classique (instantanée, ne pas s'amuser avec le moment cinétique), rapport gyromagnétique. On passe au quantique, quantification du moment orbital, moment magnétique induit, facteur de Landé. Ajout du spin des particules, facteur de Landé. Somme des deux, moment dû au noyau négligeable, on obtient aussi un facteur de Landé entre 1 et 2. Ordre de grandeurs du magnéton de Bohr. Magnétisme des atomes.

3) *Paramagnétisme et ferromagnétisme* : interaction avec un champ extérieur, et entre spins. Pour champ extérieur, on va s'aligner. Mais aussi entre spin. À comparer avec l'ordre de grandeur de l'agitation thermique. Différence qualitative entre ferromagnétiques et paramagnétiques. On va étudier séparément les deux. Noter dès maintenant qu'il n'y a ferromagnétisme que dans les corps solides. Pour paramagnétisme, on ne va s'occuper que de la susceptibilité en présence d'un champ extérieur. Pour le ferromagnétisme, on verra comment il est possible d'avoir une aimantation sans champ extérieur.

II) Le paramagnétisme

*1) *Théorie classique du paramagnétisme* : présentation, paramagnétisme de Langevin, ne pas faire l'intégrale, on obtient par intégration une fonction, la fonction de Langevin.

2) *Paramagnétisme pour un spin 1/2* : faire pour un système de spin 1/2, réseau cristallin, particules indépendantes et discernable, Hamiltonien, petit calcul rapide, on arrive rapidement sur le résultat. Joli courbe, zone linéaire, saturation, comparaison avec Langevin, on obtient un résultat trois fois plus élevé, OdG divers et variés.

3) *Généralisation* : par un calcul similaire, on obtient un résultat similaire avec la fonction de Brillouin d'ordre j , limites, loi de Curie, ok!

4) *Paramagnétisme de Pauli* : résultat expérimental pour les métaux, paramagnétisme indépendant de la température. Comme pour toutes les propriétés des métaux, c'est que les électrons forment un gaz de fermion avec une température caractéristique énorme, et seuls les électrons périphériques jouent un rôle. Nouvelles énergies en présence du champ, répartition des électrons, décalage des répartitions, calculs par approximation de température nulle, résultat, ça marche bien. OdG des susceptibilités magnétiques.

III) Le ferromagnétisme

1) *Solides ferromagnétiques* : que des solides, Fer Co Ni et lanthanides, explication, petit blabla sur propriétés intrinsèques et transition de phase ferro/para, quand l'agitation thermique prend le dessus. OdG, températures de Curie.

2) *Hamiltonien d'interaction* : présentation des différents termes, origine physique, interaction d'échange, explication qualitative, mais le problème va être très compliqué à résoudre en pratique! Nécessite une approximation : l'approximation du champ moyen.

3) *Approximation du champ moyen* : le faire, résoudre. Le Diu est pas mal, Fauvarque conseil le Trémollet. Essayer d'expliquer simplement, présentation du Hamiltonien.

4) *Champ extérieur nul* : résultat, par point d'intersection, température critique, aimantation, OdG, etc ...

5) *Champ extérieur non nul* : résultat, comportement au dessus de T_c , en dessous de T_c .

6) *Interprétation quantique* : fonction d'onde qui interagissent, champ créés par un spin, OdG pour J, parler d'antiferromagnétisme et ferimagnétisme, noter qu'une interaction à courte portée devient une interaction à longue portée. Ordre de grandeur des domaines de Weiss par des tailles caractéristiques. Ouverture : problèmes du champ moyen, résolution par modèle d'Ising, on peut le résoudre analytiquement en 3d si il reste un peu de temps, mais rapidement (et puis je suis sûr que le jury sera impressionné si on le fait!).

LP 46 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Bibliographie : BFR d'électromagnétisme, Tout-en-un PSI-PSI*, Tremolet

Niveau : PSI ou L3, à méditer

Pré-requis : Électromagnétisme du vide, étude des diélectriques, électrocinétique, mécanique

I) Aimantation de la matière

1) *Paramagnétisme, ferromagnétisme* : certains corps ont des moments magnétiques microscopiques, d'origine quantique, qu'on n'expliquera pas en détail ici, mais on en donne des OdG. Ils vont d'une part réagir aux champs magnétiques extérieurs, et d'autre part pouvoir avoir une aimantation en absence de champ extérieur. Cette seconde classe de matériaux est constitués des ferromagnétiques. Seulement des solides, assez rares, Fe, Co, Ni et lanthanides. Pour les décrire correctement, on va devoir introduire des grandeurs adaptées à cette étude.

2) *Aimantation* : définition, unité, densité volumique équivalente à des courants volumiques, avec petite démo, densité surfacique sans démo. Interprétation comme des boucles de courants voisines, utilité d'un point de vue électromagnétique.

3) *Équations de Maxwell dans la matière* : les écrire, faire apparaître les termes intéressants. Introduction de l'excitation magnétique, sens physique, relation de passage.

4) *Susceptibilité et perméabilité magnétique* : c'est bien cool tout ça, mais nous en pratique, on aura seulement l'excitation magnétique, comment relier celle-ci à l'aimantation. Donner la perméabilité et susceptibilité magnétique, cas paramagnétique, ok, cas ferromagnétique, on voit que les OdG sont très différents, non linéarité possible. Sens physique, paramagnétiques où les dipôles ne communiquent pas (ou peu, plutôt), ferromagnétiques où chaque dipôle voit le champ de tout ses voisins, ce qui rend le problème assez compliqué!

II) Étude expérimentale du ferromagnétisme

1) *Courbe de première aimantation* : forme, trois zones, saturation. OdG très différents, valeur de l'aimantation à la saturation, lien avec l'OdG d'un moment magnétique atomique.

2) *Interprétation mésoscopique, domaines de Weiss* : (manip de la plaquette pour les domaines de Weiss, mais attention ici c'est du dipôle-dipôle, et pas interaction d'échange) introduction, observation expérimentale, description, taille caractéristique, taille des frontières, OdG par considérations énergétiques, ok, domaines de fermeture, formes dues aux relations de passage du champ, effet du champ magnétique externe pendant la première aimantation, effet Barkausen.

3) *Montage expérimental* : c'est très clair dans le tout-en-un, le présenter rapidement et proprement, faire les approximations nécessaires, on peut bien tracer l'un en fonction de l'autre.

4) *Étude du cycle d'hystérésis* : présentation, champ rémanent, champ coercitif, irréversibilité, OdG, ferro doux et durs, forme du cycle en pratique selon le matériau, pertes par hystérésis.

III) Utilisation des ferromagnétiques

1) *Ferromagnétiques doux* : peu de dissipation, car cycle avec peu de surface, utile pour la conversion de puissance. a) Transformateur : étude rapide, le concept a déjà été introduit dans le II), circuit magnétique, pertes dues au ferro, comment le gérer, etc ... b) haut-parleur, « tout ce qui est piloté » (O. Fauvarque).

2) *Ferromagnétiques durs* : a) création d'aimants permanents, comment on fait, pourquoi certaines formes particulières, comment désaimanter, etc ... b) disque dur : dire qu'on arrive à faire des mono-domaines, etc ...

LP 47 : Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Bibliographie : BFR d'électromagnétisme, Tout-en-un MP-MP*, Kittel, A&M, Diu de phy stat

Niveau : L3

Pré-requis : Électromagnétisme, mécanique, physique statistique, mécanique quantique

Remarque : Bien évidemment, on suppose que tout ce qui description et utilisation de la loi d'Ohm est connu, on va dans cette leçon essayer de comprendre comment expliquer la conductivité et sa dépendance en température en fonction du solide considéré.

Introduction : introduire la conductivité et la mobilité

I) Modèle de Drude

1) *Modélisation de la conduction :* électrons libres dans un réseau d'ions, OdG des distances interatomiques.

2) *Calcul de la conductivité :* résolution du calcul classique par les chocs, loi de Poisson, intervalle moyen entre deux chocs, libre parcours moyen, interprétation comme temps de relaxation, ok.

3) *Dépendance en température :* plus d'agitation thermique, donc la surface efficace des ions, ou tout du moins des défauts sur lesquels les électrons choquent augmente, donc l'intervalle moyen entre deux chocs diminue, donc la conductivité diminue. Cependant, difficile à quantifier.

4) *OdG :* on obtient des libres parcours moyen beaucoup trop grands, notre théorie n'est pas vraiment probante, il va falloir trouver autre chose.

II) Caractère quantique du gaz d'électron

1) *Niveaux d'énergie électronique :* par les ondes planes, on obtient des niveaux d'énergies, calcul et OdG de toutes les grandeurs importantes, température de Fermi énorme : le gaz se comporte à température ambiante comme hautement quantique!

2) *Calcul de la conductivité :* écriture du PFD sur les vecteurs d'onde, équivalent quantique du modèle développé dans la première partie, déplacement d'ensemble de la sphère de Fermi, on obtient bien ce qu'on voulait. On obtient aussi les mêmes résultats pour la dépendance en température, avec les chocs sur les impuretés, les défauts, et les phonons (il y en a de plus en plus avec la température).

3) *OdG :* on trouve bien des résultats cohérents. Seulement, comment savoir ce qui est métal, et ce qui est isolant ?

III) Théorie des bandes

1) *Modèle des électrons quasi-libres :* il faut prendre en compte en plus le potentiel du réseau, faire un peu en mode one again à la Kittel, c'est cool.

2) *Bandes d'énergies :* Mini ouverture sur des théories plus complètes, théorème de Bloch, forme des bandes, etc ... mais on ne va pas insister ici, puisque ce n'est pas le centre de la leçon, on va simplement donner les résultats principaux. PZB, nombre d'état dans chaque bande, ok (ne pas s'attarder sur les semi-métaux).

3) *Différents comportements :* description de ce qui apparaît, conducteurs, isolants, semi-conducteurs (dire qu'il n'y a pas de différenciations franches), plein d'ordre de grandeurs de partout, prévision du caractère conducteur ou isolant à partir des électrons mis en commun.

IV) Les semi-conducteurs

1) *Porteurs de charge dans les semi-conducteurs :* électrons et trous, présentation, masses effectives (ne pas insister là-dessus).

2) *Densité de porteurs :* le calcul est fait dans le Diu, il est cool, donner alors la conductivité en fonction de la mobilité. Compétition avec la température, en pratique on ne voit que l'augmentation du nombre de porteur au premier ordre.

3) *Dopage des semi-conducteurs :* présentation du principe, ok. On ne vas pas faire de calculs précis ici, on va tout expliquer à la main. Ordre de grandeurs des énergies : énergie d'activation du dopage, énergie du gap. Zone intrinsèque, zone extrinsèque. Avec tous les outils à notre disposition, on montre qu'on peut expliquer sans problème la dépendance de la conductivité en fonction de la température, et on a la classe!

LP 48 : Phénomènes de résonances dans différents domaines de la physique

Bibliographie : Landau de mécanique, Pérez de mécanique, tout-en-un sup, Cagnac

Niveau : CPGE PC

Pré-requis : Mécanique, électrocinétique, électromagnétisme, optique physique

I) Oscillateur harmonique forcé

1) *Présentation du système* : oscillateur harmonique forcé, on étudie à une fréquence donnée car le système est linéaire.

2) *Solution générale* : résolution, on voit que l'amplitude est indépendante des conditions initiales ! En fait, l'oscillation est amplifiée jusqu'à ce qu'on ne puisse plus lui fournir de l'énergie, il n'y a plus d'échange d'énergie car la puissance transférée est nulle en moyenne. Mais que se passe-t-il si on excite l'oscillateur à sa fréquence propre.

3) *Excitation à la pulsation propre* : résolution soit par intégration astucieuse soit par DL de la solution générale. On voit que l'oscillation augmente de plus en plus, à l'infini. On lui fournit en continu de l'énergie, d'ailleurs de plus en plus, car l'amplitude est proportionnelle au temps (à grands temps). Lien avec l'isochronisme et explication heuristique avec un oscillateur auquel je donne des coups, explication de l'étymologie de résonner, comme « re-sonner » pour une cloche. Problème, on ne va pas en pratique avoir une énergie qui diverge, bien évidemment, mais soit rupture du système, soit sortie du domaine d'isochronisme, et donc invalidité de la description par oscillateur harmonique. Exemple des militaires qui marchent sur un pont. En pratique on a aussi dissipation de l'énergie, et le maximum d'amplitude va plutôt être celui où l'énergie fournie au système est égale à l'énergie dissipée.

4) *Résonance* : on voit que les systèmes vont pouvoir capter beaucoup d'énergie à certaines fréquences, cela va définir la résonance. On va l'étudier en rajoutant pour commencer un terme d'amortissement.

II) Forçage d'un oscillateur réel

1) *Modèle de l'oscillateur amorti* : présentation, lien avec la réalité, en mécanique, proche d'une position d'équilibre avec dissipation, en électrocinétique, RLC, modèle de l'électron élastiquement lié.

2) *Résonance en position* : le faire très rapidement, bien expliquer qu'on a déjà vu le résultat, blablabla, amplitude, phase, condition de résonance, visualisation.

3) *Transfert d'énergie* : puissance fournie par l'opérateur en fonction de la pulsation, considération sur la courbe toute intégrée, et sur la largeur du pic et sa hauteur. On voit bien que plus le facteur de qualité est grand, plus l'énergie n'est transmise que dans une plage de fréquence très étroite !

III) Application du forçage d'un oscillateur

1) *Généralité du problème* : bonne description autour d'une position d'équilibre. Mais plus généralement, autour d'une résonance, on a (par le fait même que le facteur de qualité est très important) que le comportement asymptotique est très bien décrit par ce modèle. En effet, même si il y a plein d'autres termes, celui du à la résonance l'emporte.

2) *Transfert d'énergie* : soit c'est une dissipation inutile, et on veut absolument l'éviter, dans ce cas là, il faut s'en éloigner, ou changer volontairement le système pour décaler la résonance, ou l'atténuer (amortisseurs de voiture). On peut aussi se mettre à la fréquence et l'utiliser. Par exemple pour la diffusion, on va diffuser principalement certaines fréquences, parler du bleu du ciel, mais aussi de la résonance du sodium.

3) *Sélection de fréquence* : en fait, cela revient au transfert d'énergie, mais si on fait une impulsion brève, seule vont rester les fréquences proches de la résonance, qui ont accumulée de l'énergie, retour sur le nombre d'oscillations proche du facteur de qualité, on a déjà vu ça on ne le redémontre pas dans cette leçon. Cela peut permettre de filtrer, notamment en électronique ! Parler aussi des lattes de plancher qui vibrent devant des enceintes !

IV) Cavités résonantes

1) *Présentation* : ondes planes qui se baladent dans une cavité avec des conditions aux limites très strictes. Type corde de Melde, acoustique, Perot et Fabry, on voit que c'est très général !

2) *Sélection de certaines fréquences* : résolution générale, dans l'aller retour, on doit revenir en phase, sinon on interfère. Résolution de la corde de Melde, on voit apparaître une infinité quantifiée de fréquences. Noter que l'amplitude est ici aussi donnée par la dissipation dans la cavité, ainsi que la sortie d'énergie par les parois. Pour ce qui est de la dissipation, plus la fréquence augmente, plus elle est grande, c'est pour cela qu'il est souvent suffisant de n'étudier que les premiers modes. On peut bien sur généraliser, en inclinant les rayons, en mettant des indices différents, etc . . . Mais c'est le même principe.

3) *Application des cavités résonantes* : sélections de fréquences, exemple des instruments de musique, du laser. Dispersion de fréquences : grand facteur de qualité, ça dépend de l'angle, on peut séparer les différentes fréquences !

Conclusion : On a bien montré la description et les effets de la résonance dans de multiples domaines de la physique. En effet, on a évoqué la mécanique, les ondes mécaniques, l'électrocinétique, l'électromagnétisme, la physique atomique, l'acoustique et l'optique ; c'est pas trop mal !

LP 49 : Oscillateurs, portraits de phase et non-linéarités

Bibliographie : Tout-en-un sup nouveau et ancien programme, Mécanique de FR (pour quasiment tout), BUP « portrait de phase », BFR mécanique, Pérez mécanique (pour anharmonicité), autre

Niveau : ?

Pré-requis : Mécanique du point, frottements solides

I) Oscillateur et portrait de phase

1) *Oscillateur* : on se restreindra à des systèmes à un degré de liberté solutions d'une équation différentielle. Exemple du pendule pesant, de l'oscillateur harmonique. On veut chercher une méthode pratique pour les décrire.

2) *Portrait de phase* : écriture systématique de l'ED, différence dimension degré de liberté (personnellement je ne suis pas d'accord avec le Tout-en-un, attention), remplacement par deux équations du premier ordre, unicité des solutions avec CI, notion de trajectoire. Portrait de phase, vocabulaire, trajectoire de phase, point de phase, etc... Équivalence entre l'ensemble du portrait de phase et l'équation différentielle.

3) *Oscillateur harmonique, premières propriétés* : présentation rapide, bim bam boum, forme du portrait de phase, premières propriétés : sens de parcours, points particuliers et positions d'équilibre, non-croisement, périodicité, courbe iso-énergétique pour des systèmes conservatif.

4) *Propriétés générales des portraits de phase* : sens de parcours, points particuliers et positions d'équilibre, non-croisement, périodicité, courbe iso-énergétique pour des systèmes conservatif, réversibilité, linéarité (il sera très intéressant de revenir sur tous ces points à chaque nouveau tracé de portrait de phase).

III) Non-linéarités

1) *Équation différentielle non linéaire* : rappel, bien dire que ça n'a rien à voir avec la conservation de l'énergie, la réversibilité, etc... Donner des exemples, NS, pendule pesant. Bien dire que même si la solution horaire n'est pas évidente, on peut quand même avoir la forme de la solution. Et c'est pour représenter celle-ci que le portrait de phase est particulièrement adapté.

2) *Pendule pesant* : résolution, différentes trajectoires, petites oscillations (on retrouve bien des oscillations harmoniques suffisamment proche d'une position d'équilibre, tant qu'on n'a pas d'amortissement).

3) *Apparition d'harmoniques supplémentaires* : cas du pendule pesant, le faire, caractéristique des non-linéarités ; on peut le forcer à une fréquence donnée, on verra apparaître d'autres harmoniques !

III) Attracteurs

1) *Oscillateur harmonique amorti* : résolution, attracteur ponctuel. Noter que théoriquement, l'attracteur n'est atteint que pour un temps infini, mais qu'en pratique d'autres effets apparaissent au bout d'un moment, et qu'on a bien arrêt de l'oscillateur. Linéarité.

2) *Pendule pesant amorti* : résolution graphique, infinité d'attracteurs ponctuels, non linéarité.

3) *Oscillateurs entretenus* : généralités, on donne de l'énergie au système, on va pouvoir avoir des attracteurs non ponctuels !

IV) Raccordement d'équations différentielles

1) *Oscillateur amorti par frottements solides* : résolution, blablabla, faire court et propre, on a un attracteur qui est un segment, représentation temporelle, efficacité des portraits de phase pour la description du système.

2) *Mouvement collé-glissé* : présentation et résolution, régime harmonique, régime anharmonique, on a bien un cycle limite, hautement non-linéaire, applications. Encore une fois grande efficacité des portraits de phase, surtout pour des problèmes non-linéaires !

Leçons de Physique Version O. Fauvarque

*"Le monde nous échappe puisqu'il redevient lui-même."
A. Camus – Le mythe de Sisyphe*

LP1 : Contact entre deux solides. Frottement.

Bibliographie : BUP 798 pour une modélisation microscopique des frottements d'après l'état de surface. Gié de Mécanique Volume 2. Tec& Doc PC/PC*. Tout-en-Un MP/MP*

Prérequis : Cinématique du solide. Théorie de la dynamique.

Introduction : Constat. Sans le sol nous tomberions! Existence de forces entre les solides. D'origine électrostatiques, à courte portée. A priori très compliqué! On se propose de présenter un modèle efficace et applicable. Clôre le bilan des forces et prendre en compte les interactions entre solides.

I) Modèle du contact entre deux solides : modèle du contact ponctuel

1. Généralités

Deux solides (S1) et (S2) en contact en un point I entouré d'une petite surface σ . Où les points I1 et I2 (surfaces associées également) appartiennent aux solides.

Quatre résistances au mouvement : interpénétration, glissement, roulement et pivotement.

Expérience : Montrer les 4 mouvements associés à l'aide d'une boule sur le bureau.

Faire le lien avec le "torseur" (sans le nommer) des vitesses.

2. Actions mécaniques, modèle du contact ponctuel

Dessin qui va bien. Projections. Résultante. Moment. Bien dire de S1 sur S2.

A priori, interactions sur la petite surface. Prendre en compte les actions totales, il faudra intégrer. Très compliqué, d'autant que la modélisation qui va suivre est très efficace : on ne considère qu'un seul point d'interaction I.

Le moment est donc nul. Il ne reste que le glissement. Cela revient à ne pas considérer de résistances au pivotement ou roulement.

Les actions de contact forment un glisseur en I. Il ne reste que R et N.

Expérience : différence entre une aiguille et un large cylindre. L'on s'imagine aisément qu'il est plus facile de pivoter avec l'aiguille.

3. Limite du modèle

Tout cela peut sembler un peu absurde. L'aiguille juste présentée a par l'évidence de sa capacité à pivoter et à rouler nécessairement un contact rigoureusement ponctuelle avec le bureau. Puisque le large cylindre, sans rompre la liaison, ne peut pas rouler! De même pour la balle de ping-pong, si elle roule et pivote elle a forcément un contact ponctuel.

Néanmoins, il est difficile de croire que la modélisation ponctuelle de l'interface boule bureau ou aiguille bureau soit physique. Il faudrait admettre qu'un seul atome de chaque côté interagisse (perfection géométrique). Ce qui est déraisonnable. Essayer de trouver une image du bout d'une aiguille.

Pour résoudre le problème, il faut en fait lever une caractéristique des solides : l'indéformabilité. A l'interface, il y a bien un contact surfacique mais roulement et pivotement peuvent être possibles s'il y a tolérance d'une légère déformation.

4. Puissances des actions de contact

On oublie que le moment est nul. Calcul de P1, P2 et P. Simplification pour retrouver $P = \vec{u} \cdot \vec{T} < 0$. Dire que P est indépendant du référentiel.

Dire que l'un des P1, P2 peut être positif dans le cas d'un entraînement par frottements.

Dire nul si roulement sans glissement, ou glissement sans frottement.

Parler des autres mouvements possibles, pivots, glissière etc. Du caractère idéal des liaisons.

II) Lois de Coulomb

1. Problématique

On reprend l'aiguille qui glisse sur le bureau, ou le cylindre. On fait un bilan des forces au niveau du point de contact. Poids, T, N, opérateur. On voudrait remonter à la dynamique du solide. Bien dire que les forces de frottement sont **non données**.

2. Cône de frottement

J'incline l'aiguille du doigt avec un force d'appui constante. Il y a mouvement dès lors que je passe au delà

d'un certain angle.

Schéma qui va bien. Définition propre de tous les termes.

3. Statique : quelques exemples.

on a juste besoin des angles ici.

Arc-boutement (arche des églises)

Pas des vis.

4. Lois de Coulomb pour une interface

Expérience : montrer l'existence d'un angle limite identique quelque soit la modélisation de la surface.

Dire "On admet que Coulomb est valable élémentairement. Contact plan/plan 3° de libertés, V_x , V_y , V_z mais loi de Coulomb globale pour V_g ."

Dire que tout cela est très rassurant ! Qu'en soit, un plan plan, c'est un ponctuel plan avec des degrés de liberté en moins. Il faut alors juste appliquer le cône de frottement.

5. OdG et interprétations microscopiques

OdG de coefficient de frottement.

État de surface. Énergétique, premier principe.

6. Oscillations avec frottement de glissement*

Gié. Notion de raccordement d'équa. diff.

III) CoefficientS de frottement

1. Expérience introductive

Sommerfeld.

2. Coefficients de frottement cinématique/dynamique

Définitions. Graphe. Parler de l'hystérésis et de l'exemple du lit.

3. Calculs

Suivre la démarche du Tout-en-Un MP.

4. Collé/Glissé

Craie sur le tableau. Corde de violon.

LP2 : Caractère non galiléen du référentiel terrestre

Bibliographie : Gié de Mécanique Volume 1. Tout-en-Un PCSI ancien programme. Pérez de méca.
Prérequis : Lois de la dynamique en référentiel non galiléen. Accélération d'entraînement, centrifuge.

I) Référentiels

1. Référentiel galiléen

Référentiel dans lequel une particule isolée a un mouvement rectiligne et uniforme. Ou autrement dit, un référentiel dans lequel les lois de Newton sont valables.

Tous les référentiels galiléens sont en translation rectiligne et uniforme les uns par rapport aux autres. Relativité galiléenne : les lois de la mécanique sont les mêmes dans deux référentiels galiléens (non distinguables).

3. Quelques référentiels

Copernic, héliocentrique, géocentrique (pour l'améliorer il faut prendre en compte la précession des équinoxes 26000 ans), terrestre.

4. Référentiel terrestre

Définition, schéma (z zénith, y est, x sud, λ latitude). C'est notre salle!

Il faut le mettre à l'épreuve de sa définition. Les lois de Newton sont-elles respectées?

On lance une expérience, on en observe le résultat, est-ce en accord avec le PFD? Ou autrement dit, a-t-on pris toutes les forces en compte?

Cela va bien sûr être une question de précision des mesures! Plus l'expérience sera précise, plus il sera facile de mettre en défaut le caractère galiléen d'un référentiel.

Si les effets non galiléens sont cumulatifs, on aura des effets plus grands sur des expériences plus longues ou plus vastes!

Donc en définitive, un référentiel est galiléen vis-à-vis d'un temps caractéristique ou d'une échelle caractéristique.

Remarque il faut bien dire que ce temps caractéristique n'apparaît que si la force perturbative n'est présente qu'en dynamique (et pas en statique).

Transition : Origines potentielles du caractère non galiléen. On veut $\sum \vec{F} = m\vec{a}$. Avec le poids toujours au moins présent dans le bilan des forces, celui-ci pointe vers le nadir. Pour mettre en défaut le caractère galiléen, il va falloir mettre en exergue la présence d'autres forces. Soit d'interaction, soit inertielles.

II) Redéfinir l'accélération de pesanteur

1. Verticale statique : influence inertielle

Un fil à plomb pend vers le sol. Est-on certain que sa direction corresponde parfaitement avec \vec{u}_z ?

Dessin, somme des forces en statique. Force centrifuge. Discussion de ce qu'est la verticale. OdG, dire que l'on est moins lourd à l'équateur qu'aux pôles.

Conclusion : prise en compte d'un effet inertiel, référentiel galiléen "local".

2. Une terre sphérique? : influence d'interaction

Première conséquence : la terre n'est pas sphérique!

Si la précision des mesures s'accroît on peut détecter d'autres défauts dans le champ de pesanteur, à savoir que la répartition de masse inégale sur la terre ainsi qu'à ce caractère ellipsoïdal.

On peut déterminer ainsi un champ de pesanteur local dépendant de la géolocalisation.

Formule, dire que c'est une relation empirique. Dire que cela peut servir à détecter des gisements etc.

III) Effets de marée

Ce champ pris en compte, l'on peut se dire que la terre est figée. (Un 35 tonnes passe mais l'on peut négliger.) Il y a néanmoins une force d'interaction gravitationnelle qu'il faudrait prendre en compte : celle du soleil et de la lune! Effet différentiel! OdG sur la tour Eiffel. Puis sur l'échelle de la Terre.

Phénomène des marées! Dire aussi que ce champ perturbatif n'est pas statique, stricto sensu, mais s'étale sur la journée.

Remarque sur la limite de Roche, sur les marées terrestres de Io et Holst.

Transition : Corrections statiques. Être en référentiel galiléen consiste d'abord à bien savoir quelles forces statiques il faut toujours prendre en compte. Équivalence entre force centrifuge et gravitationnelle.

Si l'on voulait s'assurer que la terre tourne bel et bien, l'on ne pourrait mettre en avant l'évolution du vecteur pesanteur puisque qu'une autre répartition de masse aurait exactement le même effet. On peut maintenant s'intéresser aux corrections dynamiques.

IV) Corrections dynamiques

1. Pendule de Foucault au pôle nord

Caractère quasi identique du référentiel terrestre et du référentiel géocentrique au pôle nord.

A priori le pendule reste dans son plan initial d'oscillations.

Montrer que cela est valide dans le référentiel terrestre si l'on prend en compte les forces de Coriolis.

OdG. Si l'on peut détecter un angle de l'ordre de ... il faudra que l'expérience dure au moins ...

Extension aux latitudes tempérées. Principe du gyroscope. Étymologie.

2. Déviation vers l'Est. Verticale dynamique.

Expérience de Reich. 1833. Méthode perturbative.

Remonter au décalage vers l'Est.

Montrer que l'on peut retrouver le résultat dans le référentiel géocentrique en prenant un composante radiale.

OdG. Citer rails, rivières, forces d'érosion.

3. Raisonnement général

Quand la force de Coriolis est-elle négligeable ?

4. * Vents voir Pérez

Cyclones, anticyclones, poteau noir, alizés... etc.

Conclusion : Y-a-t-il un référence galiléen ? Étrange correspondance entre les effets inertiels et gravitationnels ? Base de la RG.

LP3 : Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique

Bibliographie : Gié. Mécanique Volume 1 et 2. Pérez Mécanique. BFR. Cohen-Tannoudji – Mécanique quantique I. Cagnac pour la RMN.

Niveau Licence 3.

Pré-requis : Mécanique du solide, matrice d'inertie, effet d'un champ B sur un moment magnétique.

Introduction : Manipulation de la toupie. Comment cela se fait-il que la toupie quand elle ne tourne ne tombe pas ?

I) Mouvement autour d'un point fixe. Approximation gyroscopique.

1. Éléments de cinématique

Définition des angles d'Euler. Nutation, précession, rotation propre.

Base de Résal, base liée au solide. Définition du vecteur rotation. Montrer chaque angle, chaque vecteur sur le gyroscope.

Moment cinétique, matrice d'inertie.

2. Mise en équation

TMC au point fixe.

Premier cas : gyroscope équilibré. \vec{L} est constant. Bien insister sur le repère dans lequel il est constant.

Second cas : couple du poids. Blablabla. Calcul compliqué en général.

3. Approximation gyroscopique pour gyroscope déséquilibré

Mouvement de rotation propre prépondérant. $\phi_t \gg \theta_t, \psi_t$ et dérivées croisées également. Dire que les coefficients de la matrice d'inertie sont supposés du même ordre de grandeur.

On présente ici l'équation simplifiée. $\phi = \omega = \text{constante}$ et $\psi_t = \frac{m l g}{J \omega}$.

Dire qu'en fin de compte cela revient à écrire : $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Omega}_p \times \vec{L}$

Dire qu'ici on a supposé une liaison parfaite, cela revient à un mouvement horizontal du centre de gravité.

Expérience : Montrer le gyroscope équilibré. Le lancer, il ne bouge pas. Le déséquilibrer un peu, il précesse.

OdG sur le gyroscope et sur la toupie pour justifier l'approximation gyroscopique.

Montrer éventuellement les différents types de précession, oscillations entre deux θ . Mais l'on est plus dans l'approximation gyroscopique car on veut $\theta = \text{constante}$.

Insister sur le caractère contre intuitif : force vers le bas mouvement orthogonal à l'axe de rotation !

II) Effets et Applications dans le domaine macroscopique

1. Couple gyroscopique

Gyroscope équilibré. Effet inverse. Expression.

Parler de balistique, de moto, des roues d'inertie (BFR), ballon de rugby etc. Effet de stabilisation !

2. Un peu d'étymologie

Gyroscope équilibré. Garde son axe aligné. Détection des angles !

Application aux horizons artificiels des avions, guidage de manière générale (sous marin, missile).

Gravity probe B dans l'espace, 4 satellites, gyroscope le plus précis, vérification de la RG. Sensibilité attendue : 1,1e-05 degrés par an.

3. Compas gyroscopique

Image dans la base de données. Liaison de Cardan. Permet de pointer le nord. Géolocalisation.

4*. La toupie terrestre : précession des équinoxes

Bien vérifier l'approximation gyroscopique.

Due au couple du soleil et de la lune.

Impact astronomique.

III) Effets microscopiques

Analogie formelle avec l'équation de précession $\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\Omega}_p \times \vec{L}$.

1. Rapport gyromagnétique et précession de Larmor

On aboutit à $\vec{\mu} = \gamma \vec{L}$.

Action d'un champ magnétique. $\Gamma = \vec{\mu} \times \vec{B}$. Précession à $\Omega_p = \dots$

Bien dire qu'il n'y a pas d'approximation gyroscopique ici!

Cas de l'électron, modèle de Bohr. On justifie la relation liant moment magnétique et moment cinétique.

Puis on met en exergue une "vérification" de l'approximation gyroscopique : $\Omega_p = \frac{eB}{2m} \ll \phi_t = \frac{v}{r_0}$.

Le champ ressenti par l'atome est moyenné sur un très grand nombre de période! Autre façon de voir l'approximation gyroscopique!

2. Résonance magnétique

Calcul dans le référentiel tournant.

Application RMN (mais attention RMN c'est avec le spin du proton).

Conclusion : Effets gyroscopiques sont contre-intuitifs. Peu de contact qu'on a avec des machines tournantes. Vélo, moto, disqureuse... Équation de la précession qui est fondamentale, avec ou sans approximation. Celle-ci est présente tant de le monde macro qui microscopique. Immenses applications : RMN, IRM.

LP5 : Cinématique relativiste

Bibliographie : Feynmann, Gié de Mécanique, Landau Théorie des champs. Hladik, Introduction à la RR. Semay Relativité Restreinte.

Niveau L3

Pré-requis : Mécanique classique. Électromagnétisme.

Rappel : La cinématique est l'étude de la description des mouvements dans l'espace, donc autant de la position de points que de leur évolution dans le temps.

I) Les principes de la relativité restreinte

1. Historique

Relativité galiléenne (mécanique classique), transformation des vitesses, temps absolu.

2. Incompatibilité avec l'électromagnétisme

Maxwell donne une vitesse de la lumière, par compatible, problème ! De plus, les équations de Maxwell ne sont pas invariantes par la transformation de Galilée.

Introduction d'un référentiel privilégié, éther, résultats expérimentaux.

3. Les principes de la relativité restreinte

Caractère de l'espace temps. Principe de relativité, (invariance de la célérité de la lumière).

Mais les transformations des vitesses ne sont plus valables, tout comme celle des positions. On va en chercher qui laissent invariantes ces nouvelles lois physiques prises comme base, à savoir :

II) Transformations de Lorentz

1. Notion d'événement

Bien insister sur la notion d'événement, en donnant des exemples probants, comme le fait de claquer des doigts ici, en appuyant sur le caractère « ici et maintenant ».

Problème, le temps n'est plus absolu, c'est une nécessité, notamment pour l'invariance de la vitesse : de la lumière.

On ne peut plus décrire séparément temps et espace, et décrire simplement la position au cours du temps. On va donc introduire la notion d'événement, et d'espace-temps.

2. Intervalle

La distance géométrique n'a plus de sens, il faut autre chose qui soit invariant relativiste, car on cherche à présent à décrire la physique par des quantités qui ne dépendent pas du référentiel inertiel qu'on va choisir. L'exemple de l'arbre par Feynman présenté de façon convaincante, est particulièrement intéressant.

Généralisation à tous les types d'événements. Définitions des intervalles. Justification de leur appellation.

3. Diagramme d'espace-temps

Attention, Lorentz ou Minkowski. Choisir Lorentz ici, même si on ne peut y représenter que deux diagrammes.

Présentation du diagramme d'espace temps, différentes zones, noms, exemple du soleil qui s'éteint, seul les définitions invariances relativistes comptent.

4. Transformation de Lorentz

On se restreint à 1D pour plus de simplicité, mais c'est la même chose.

Exploiter le fait que la vitesse de la lumière est invariante. Dire comment on peut y aboutir en utilisant les propriétés de l'espace temps.

Présentation, remarques multiples et variées.

Facteurs γ et β , limite non-relativiste. Interprétation sur le diagramme d'espace-temps.

III) Dilatation des temps, contraction des longueurs

Assortir cette partie de diagrammes d'espace temps.

1. Dilatation des temps, Temps propre

Ça semble une aberration, mais c'est en fait une nécessité pour avoir l'invariance de la célérité de la lumière ! Il a bien fallu abandonner un temps absolu.

Exemple sur le wagon de train qui avance, formule. Pareil par Lorentz, dilatation des durées par rapport au temps propre.

Différence avec un temps absolu, jumeaux de Langevin (voyage vers Andromède), expérience de Feynman avec les muons cosmiques.

Bien mettre en avant que pour les lois physiques autres que la description du mouvement, **seul le temps propre compte**, que c'est le « temps local » à prendre en considération.

2. Contraction des longueurs

Aller vite, et ne pas perdre de temps. Exemple de la règle d'Einstein, par exemple.

Normal pour invariance de c , que dans la direction du déplacement.

Dire que l'on peut interpréter l'expérience des muons de la même façon.

IV) Déplacements relatifs

1) Composition des vitesses

Introduction par impossibilité de dépasser c , nouvelle formule.

Démo, remarques sur les différentes limites, coureur qui croise un petit photon errant, etc ...!

2) Effet Doppler relativiste

Étude complète.

LP7 : Notion de viscosité d'un fluide

Fil rouge : frottements entre couches. Frottements solide/liquide.

I) Notion de viscosité

1. Expérience introductive

Bac de glycérine, colonne d'encre. Parler de l'opérateur, de son action, des forces de frottement, de son sens. Couche superficielle entraînée par le palet, celle du fond reste immobile. Introduire la notion de gradient d'une composante des vitesses.

2. Loi de Newton

Hypothèses : fluide incompressible. fluide dit newtonien. Pour des gradients pas trop forts. Dire que c'est légitime de la supposer sous cette forme en première approximation. Unité. Dessin qui va bien. Dépendance dans la température.

3. Viscosité dynamique, cinématique

Tableau avec OdG. Citer la poix, les vitraux, l'hélium superfluide.

4. Interprétation microscopique

Gaz dilués. Parler du transfert de quantité de mouvement du à l'agitation thermique. Qu'il en résulte la loi de Newton. Insister sur le caractère **diffusif** de la viscosité. Dire que les forces de viscosité ont tendance à "homogénéiser".

On peut d'ailleurs définir $j_{\text{diff}} = -\eta \frac{dv}{dz}$. Ce qui est une loi phénoménologique de type "Fourier". Parler de la dépendance en température. Et dire la différence avec les liquides.

II) Dynamique des fluides visqueux

1. Force volumique de viscosité

Poser le problème très proprement. Dire que la démarche est identique aux forces volumiques de pression en statiques. (On admet d'ailleurs ici que la pression est définie par le même champ qu'en statique bien que cela soit dynamique.) On finit par retrouver le Laplacien.

2. Navier-Stokes

PFD sur la particule de fluide (système fermé masse constante).

3. Retour sur l'expérience introductive

Navier Stokes stationnaire. Conditions limites par l'expérience. On trouve le profil de $v_x(z)$.

On aboutit aussi à la force de frottement sur le palet. Loi de Stokes.

Ou. Plaque oscillante qui ramène à l'équation de diffusion.

III) Frottements fluides

1. Souvenirs de Mécanique

Deux lois de frottements fluides. Problématiques : comprendre les coefficients et surtout comprendre pourquoi il y a deux régimes (et d'autres éventuellement).

2. Nombre de Reynolds

Bille sphérique qui tombe dans un fluide (η, ν) à la vitesse limite v_{lim} .

On peut construire Re nombre sans dimension.

3. Différents régimes

Différentes conditions. On peut montrer que la loi de Stokes est valable entre et ; la loi de Newton est valable entre et

Entre les deux on n'a pas vraiment de loi simple.

4. Calcul de la viscosité

Chute d'une bille dans la glycérine (dire que la vitesse limite renseigne sur la viscosité).

IV) Généralité du Nombre de Reynolds Pour n'importe quel écoulement il est possible de définir un nombre de Reynolds. Il faut juste avec en sa possession, une longueur typique, une vitesse typique et les caractéristiques du fluide (viscosité et masse volumique). Exemple : voiture, avion. OdG.

1. Interprétations

On a vu que le nombre de Reynolds caractérise le type d'interaction en solide et fluide. Est-il possible de pousser plus loin l'analyse.

- Courants de convection, diffusion. $j_{\text{diff}} = -\eta \frac{dv}{dz}$ et $j_{\text{conv}} = \mu v^2$. Ainsi $Re = \dots$

- Temps de convection diffusion.

- N.S

2. *Écoulements (tous ?) visqueux*

À bas Re. Rampant : termes non linéaires quasiment nuls. Glaciers, petites billes dans des liquides très visqueux.

Puis le Re augmente... On en vient à haut Re à négliger la viscosité... C'est le modèle de l'écoulement parfait.

Notion de couche limite dans laquelle la viscosité joue son rôle pleinement. Expérience de la poussière sur la table.

Il y règne une grande dissipation d'énergie. Chauffage.

LP8 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Bibliographie : Tout-en-Un PSI/PSI*. Gié mécanique 2. Composition 2012.

N.S dans la besace. Qu'en faire ? Deux termes délicats. Un non linéaire, un autre phénoménologique du à la diffusion qui est celui de viscosité. Pourrait-on simplifier N.S ? dans quel cadre ? et alors quelles conséquences s'offriront à nous ?

I) Modèle de l'écoulement parfait

1. Écoulement parfait

Définition : tous les phénomènes diffusifs (viscosité, conductivité thermique) sont négligés
Gradient latéral des vitesses et gradient thermique négligeable.

Dire que cela revient à grand Reynolds.

Remarque sur le fluide parfait.

2. Couche limite

Voir le Gié PC/PC*.

3. Conditions limites

II) Euler

1. Équation d'Euler

Présentation. Réécriture.

Dénombrement du nombre d'inconnues.

Vecteur tourbillon.

Écriture avec le vecteur tourbillon, écoulement rotationnel, irrotationnel.

2. Effet Coanda

Expérience de la balle de ping-pong. Incliner l'axe. Dessin qui va bien dans le Tout-en-Un PSI/PSI*.

3. Écoulement potentiel

Champ des vitesses autour d'une sphère.

Question 1, 2, 3 du paradoxe de d'Alembert du Gié de Mécanique 2.

III) Bernoulli

1. Théorèmes de Bernoulli

On rappelle qu'il restait une équation à fournir pour clore le système.

Hypothèses simplificatrices (HPPI). Sens physiques de celles-ci, regarder compo 2012.

Exploitation des diverses hypothèses.

2. Effet Venturi

Stabilité de la balle de ping-pong.

3. Sonde Pitot

(vitesse mais aussi altitude)

4. Force sur une balle et Paradoxe de d'Alembert

Dernières questions de l'exercice entamé plus haut.

LP9 : Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Bibliographie : Guyon, Hulin, Petit – Hydrodynamique physique. Pérez de Thermodynamique. Gouttes, bulles, perles et ondes – PG de Gennes. Composition 2004.

Introduction : Notre étude s'intéressait jusqu'ici à l'écoulement des fluides ainsi qu'à l'influence des solides sur celui-ci (couche limite, écoulement parfait etc.) On va maintenant s'intéresser à une partie particulière des fluides à savoir leur surface. En fait pas surface mais interface. Séparation entre deux fluides. Bien souvent cela sera air/liquide. Et il arrivera qu'une troisième phase solide participe.

Applications : détergents, micro-émulsion, transition de phase, monde du vivant. Question de Mouillage (eau sur les plumes de canard, Hg, Goretex, etc.)

I) Tension de surface

1. Origine physique de la tension de surface

Dessin qui va bien. Attraction moléculaire VdW. La force va vers le fluide.

2. Approche mécanique de la tension superficielle

Être très rigoureux dans la définition du système. Opérateur, surface (attention il y a 2 côtés). Introduire heuristiquement le coefficient de tension superficielle.

Unité de celui-ci. Donner OdG et dépendance en température (retenir que $\gamma = \gamma_0 - \alpha T$)

3. Énergie libre et minimisation

Premier principe sur la lame, évolution réversible. Aboutir sur $F = \gamma S$.

Potentiel thermodynamique. "Surface minimale".

4. Méthodes de mesure de tension superficielle

Exploitation de cette notion de minimisation. On applique une force connue et on observe un paramètre géométrique renseignant sur la forme de la surface. Ou aussi cas limite d'arrachement.

Voir exemple dans le Pérez de thermodynamique.

II) Interface statique

1. Loi de Laplace

Démonstration pour la bulle de savon (le faire d'un point de vue thermodynamique). Surpression en son sein.

Généralisation à la goutte puis lorsque qu'il n'y a plus de symétrie.

Expérience avec les bulles.

Application à la nucléation, voir Pérez de Thermodynamique ;

2. Longueur capillaire

Faire une approche à la Vashy. Égaliser terme de tension superficielle et terme gravitationnel sur une goutte d'eau.

OdG.

3. Mouillage et ménisque

Angle de mouillage. Mouillant non mouillant. Liquide (Hg, Eau, Hélium liquide) et surface.

III) Interface dynamique

Composition 2004 et BUP sur la dispersion.

Hypothèses : fluide parfait incompressible, pression + pesanteur + tension superficielle (dire que l'on sait déjà que la longueur capillaire va apparaître), linéarisation au premier ordre, écoulement potentiel, pression à la surface $P = P_0 - \frac{\rho g R}{2}$.

Expliquer les étapes. Remonter à la relation de dispersion et la discuter longuement.

Se placer dans le régime des ondes capillaires (donner les conditions de ce régime). Discussion physique.

LP13 : Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques

Bibliographie : Tout-en-Un MPSI/ PCSI/PTSI. Tec& Doc Olivier et Gié, thermodynamique. Diu de Thermo. Compo 2006

Introduction : Titre un peu anachronique. Puisqu'il faut savoir que la thermodynamique (théorie de la puissance motrice du feu) a été développée lors de la révolution industrielle du 18^{ème} siècle. Et que le second principe fut énoncé à la suite d'étude sur les machines thermiques. C'est donc une leçon "hommage", un juste retour des choses.

I) Cadre théorique des Machines thermiques

1. Définitions – Schéma de principe

Machine : Soit S un système thermo qui effectue une transformation cyclique. Si l'opérateur rétablit les caractéristiques du milieu extérieur à chaque cycle, celui-ci pourra se répéter à l'infini identique à lui-même. On dit que S constitue une machine. (Machine thermique si seulement échange thermique et travail mécanique.)

Exemples (fluide frigo, centrale nucléaire). Il semble ne pas y avoir de conservation de matière dans un moteur thermique mais supposer qu'il y a ne change rien.

Moteur électrique n'est pas une MT.

Schéma de principe. Conventions. Thermostats que l'on appelle ici "sources d'énergie thermiques".

2. Premier et Second Principe

Cycle + Fonctions d'état. Inégalité de Clausius.

3. Moteur monotherme et cycle purement thermique

Le moteur le plus simple possible. Montrer que c'est impossible. Dire que Lord Kelvin avait énoncé le second principe sous la forme de l'impossibilité du moteur monotherme.

Cycle purement thermique. Impossible. Énoncé de Clausius.

Transition : Énoncés tous rigoureusement équivalents et beau par l'absence de formule. Dissymétrie entre l'énergie mécanique (réversible) et thermique (irréversible). De Clausius on retrouve l'irréversibilité inhérente aux échanges thermiques. L'idée est de contrarier ce sens par le travail mécanique.

II) Théorie des machines dithermes

1. Premier théorème de Carnot

Corollaire de la partie précédente. "Pour qu'un système thermo décrivant un cycle fournisse de l'énergie sous forme de travail mécanique, il doit nécessairement échanger de l'énergie thermique avec au moins deux sources thermiques."

Schéma de principe.

2. Diagramme de Raveau

Graphique. Décrire les zones permises, non permises. Moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur.

3. Efficacité et rendement

Travail utile / Travail couteux.

Moteur rendement, récepteur efficacité.

Rendement en fonction des températures froides et chaudes strictement inférieur à 1 (on réchauffe inexorablement la source froide). Rendement maximum pour transformation réversible.

4. Théorèmes de Carnot – Irréversibilités

"Pour une machine réversible, le rendement ou l'efficacité ne sont fonction que des températures des sources thermiques."

Toutes les machines irréversibles fonctionnant entre deux sources ont un rendement inférieur à celui des MT réversibles.

Origine de l'irréversibilité. (Échanges thermiques entre deux sources à des températures différentes qui ne sont pas infiniment longues. Autre source, phase de compression trop rapide qui fait perdre l'isoT et donc un gradient de température.)

Veut-on vraiment atteindre l'irréversibilité? Non car perte de puissance.

5. *Considérations générales sur les cycles*

Cycle de Carnot. MonoT adiab. MonoT adiab.

Description, cycle PV, TS. Rappeler les sens moteurs ou récepteurs avec $Q = \int TdS$ et $W = - \int PdV$.

6. *OdG*

Centrale thermique, congélateur, pompe à chaleur.

III) Moteur thermique : 4 temps essence

1. *Description*

Utilisation du moteur de motoculteur. Transparent décalqué sur le cours de sup.

Admission, compression, explosion détente, échappement...

2. *Modélisation*

Cycle de Beau de Rochas 1862. Cycle réel.

3. *Rendement*

Principe du calcul. Passer vite.

4. *OdG*

Rendement théorique 0.6 (rev), réel 0.4 (irr), 0.15 (avec frottements).

Puissance. 3000 tours/minute. $V=0,1L$. (1CV=735,5W)

IV) Thermostats réels

On considère une machine thermique dont les sources froides et chaudes évoluent au cours du temps.

Moteur quasi cyclique entre deux pseudos sources. Voir Olivier et Gié, Tec& Doc, thermodynamique.

Conclusion : Tout une partie des MT concerne les fluides caloporteurs. MT diphasiques qui exploitent les changement d'état. D'autre part le rendement des MT est de plus en plus au centre des débats, industrie automobile. Cogénération, récupérer pour le chauffage centrale les eaux des centrales, "géothermie" collatérale.

LP15 : Étude statistique d'un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique

Bibliographie : Diu de Physique statistique.

Introduction : On vient de voir la description microcanonique d'un système isolé à l'ET. NVE ou NVB et on définissait S^* qui donnait $T^*P^*\mu^*$. L'hypothèse fondamentale était que E était fixée. C'est cependant une contrainte assez forte. Car bien souvent les systèmes thermodynamiques ne sont pas sans échanges thermiques ou mécaniques avec l'extérieur.

Canonique : S est en contact avec un thermostat. Hypothèse moins exigeante. E_S va varier mais T sera fixé par le thermostat.

I) Description Canonique d'un système en contact avec un thermostat

1. Cadre et définitions

Définition sur système. Dire que l'on va se servir du formalisme microcanonique.

Notion de thermostat (énergie totale fixée, fluctuations de l'énergie du thermostat très petites devant l'énergie du thermostat). Exemple d'une tasse à café qui se thermalise dans une pièce. Notion d'un thermostat vis-à-vis de la sensibilité du thermomètre.

On utilise la définition de la température microcanonique que l'on associe à la température du thermostat. C'est le paramètre fixé. A l'équilibre thermique on est alors dans la SITUATION CANONIQUE.

Définition propre de la notion de thermostat avec grâce au DL sur la température microcanonique car sinon $\frac{1}{T^*} = f(E)$

2. Probabilité des états de S

Démarche du microcanonique sur le thermostat. Le paramètre libre étant E énergie du système, la température du thermostat étant fixée.

On passe par le calcul de l'entropie microcanonique du thermostat. On aboutit à $P_{i\text{proto}}$ au facteur de Boltzmann. Ne pas oublier la normalisation.

3. Facteur de Boltzmann

Les états de plus basse énergies sont les plus probables (attention modulo la dégénérescence).

Le système communique avec le thermostat via les échanges d'énergie thermique. Équilibrage par peuplement des différents niveaux d'énergie.

Comparer $k_B T$ avec ΔE_i . Petit dessin qui va bien dans les deux cas limites.

Exemples (atmosphère isoT, loi d'Arrhénius, cinétique des gaz, expérience de Jean Perrin)

4. Fonction de partition et énergie libre

Fonction de partition, sens physique ? Pas évident. Mais intérêt mathématique certain.

Définition de F énergie libre.

Énergie moyenne, écart type, entropie, potentiel chimique, pression.

Dire que Z donne accès à toutes les grandeurs. Montrer que F est bien l'énergie LIBRE. Dire que l'on a fait une transformation de Legendre.

5. Équivalence des ensembles

Récapitulatif. Question : y a t il correspondance entre les ensembles microcanonique et canonique et sous quelles conditions ?

Oui c'est bien le cas ! Dès lors que le système est macroscopique (dire que les fluctuations sont $\propto \frac{1}{\sqrt{n}}$) et qu'on est à l'équilibre thermodynamique.

Dès lors chaque grandeur thermodynamique prend une UNIQUE valeur. Et la valeur MOYENNE est aussi la valeur la PLUS PROBABLE.

II) Applications

1. Gaz parfait monoatomique

Définition du système.

Détermination de la fonction de partition pour une particule.

Écrire la fonction de partition pour toutes les molécules. Dire "particules indépendantes". Et particules indiscernables (paradoxe de Gibbs).

Calcul de F , E , S , μ , P . Dire l'avantage par rapport au microcanonique, rapidité...

2. Paramagnétisme d'un ensemble de spins indépendants à 2 niveaux

Définition du système. Suivre les calculs du Diu.

Aller vite avec un transparent et montrer le caractère systématique de la démarche.

Aboutir à la susceptibilité magnétique et à la loi de Curie.

III*) Équilibre thermique et mécanique

1. Distribution statistique $T - P$

Généralisation de la démarche, avec un pressostat et un thermostat.

Description du système (paroi mobile).

P^* , T^* sont fixées. On étend la fonction de partition. Définition de l'enthalpie libre.

2. Application à l'élasticité du caoutchouc

Suivre le Diu. Le faire à deux dimensions seulement.

Remonter à la loi de Hooke et montrer la dépendance en température.

IV) Algorithme de Monte-Carlo

Conclusion : Ouverture sur le grand canonique. Encore plus de flexibilité : système ouvert (bouteille ouverte par exemple). Parler aussi des systèmes en interactions (Paramagnétisme de spins dépendants.) Il faut juste le prendre en compte dans le facteur de Boltzmann et le Hamiltonien.

LP16 : Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir

Bibliographie : H-prépa MP/MP*. Dui de Physique Statistique. Tec& Doc MP/MP*

Introduction : Lampe avec un générateur réglable. L'on varie l'intensité débitée dans le filament, sa température (due à l'effet Joule) varie. On observe également un décalage de la couleur du filament. Cette leçon va étudier le lien entre le rayonnement d'un corps et sa température.

Tout corps accéléré rayonne. Chocs par l'agitation thermique.

Idées à faire passer (Thiberge) : Existence d'un équilibre entre matière et rayonnement. Un corps noir est un modèle d'émetteur, ni nécessaire ni suffisant pour avoir équilibre matière-rayonnement.

I) Position du problème*1. Interaction matière rayonnement*

Émission : corps à T, agitation thermique, accélération, rayonnement $\rightarrow \phi_e$ flux surfacique émis W.m^{-2}

Absorption : Phénomène contraire à l'émission. ϕ_a flux surfacique absorbé

Réflexion et diffusion (dépend de la surface, lisse ou dépolie) ϕ_r flux surfacique réfléchi.

2. Cas limites des Milieux transparents et opaques

Transparent, il réémet intégralement le rayonnement. $\phi_a = \phi_r = 0$

Opaque : Empêche toute transmission de rayonnement.

Remarque : la transparence, l'opacité d'un milieu ne sont établies que sur une plage de fréquence.

Exemple : verre qui ne laisse pas passer les UV. On ne peut pas bronzer à travers les vitres.

3. Équilibre Radiatif

Flux incident $\phi_i = \phi_a + \phi_r$

Flux partant $\phi_p = \phi_e + \phi_r$

Flux radiatif $\phi^R = \phi_p - \phi_i = \phi_e - \phi_a$

Corps opaque à l'équilibre radiatif si $\phi_e = \phi_a$

Le corps à ER n'emmagasine, ni ne perd d'énergie.

Attention, l'ER est différent de l'ET !

II) Rayonnement d'ERT

L'idée est de considérer un bain de photon en équilibre avec une paroi à la température T (comme un thermostat). Le gaz de photons est "thermalisé" c'est à dire que les photons interagissent avec la matière, les atomes de celle-ci s'agitent sous l'action de l'oscillation EM et réémettent des photons. Parallèle avec un gaz qui se thermalise par collisions avec la paroi.

1. Densité spectrale d'énergie

On considère une enceinte transparente de volume V entourée par un milieu opaque. L'équilibre thermique est établi tout comme l'équilibre radiatif. ERT

$$u = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}, \text{ densité spectrale d'énergie } u_\nu = \frac{du}{d\nu}$$

$$u_\nu = g \frac{1}{V} \frac{dN}{d\nu} \langle \epsilon(\nu) \rangle \text{ avec } g \text{ est la dégénérescence.}$$

$g = 2$ pour chaque polarisation du photon.

Modes autorisés dans la cavité avec $(\nu \gg \frac{c}{L})$ implique $g \frac{1}{V} \frac{dN}{d\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}$. Ou alors la solution théorème II.

Énergie d'un mode quantifiée $\epsilon_n = n h \nu$ (n photons dans ce mode), facteur de Boltzmann donnent $\langle \epsilon \rangle = \frac{h\nu}{\exp(\dots)-1}$

Dire que c'est la grande prouesse de Planck que de supposer l'énergie d'un mode quantifiée.

Loi de Planck. Dire en passant que h est la constante d'aide. Parler de la présence des constantes fondamentales.

Passer à u_λ .

2. Limites de la loi de Planck

Rayleigh-Jeans. Limite classique quand h tend vers 0. Catastrophe ultraviolette. Le four à pain tueur.

Wien. Loi empirique

C'est ici que Planck a fait une percée. Il a unifier sous une même formule deux lois incomplètes. Beauté dans cette unification. C'est le leitmotiv des théoriciens. L'unification.

Parler de la présence des constantes fondamentales qui atteste d'être à la croisée des chemins.

3. *Densité spectrale des flux incidents et partant*

Intégration par isotropie de l'espace sur une surface.

4. *Conséquences*

Loi de Wien. $\lambda_m T = C_{ste}$. OdG.

Parler aussi du fait que 98% de la puissance émise se trouve dans $x \in [0, 5; 8]$

Loi de Stephan.

III) Rayonnement du corps noir

1. *Le corps noir*

Définition : un corps noir absorbe tout rayonnement thermique incident quelque soit sa longueur d'onde et quelque soit la direction d'incidence.

Corps noir est un modèle. En réalité ce sont plutôt des corps "gris". Corps noir seulement sur une certaine plage de fréquence.

Montrer un véritable spectre.

Meilleur corps noir, le CMB à 3K.

Égalité des flux, lien avec Stephan.

"Objet idéal dont le spectre ne dépend que de la température."

2. *Réalisation d'un corps noir*

Le corps noir, c'est l'ouverture. Thermalisation.

3. *Exemples de bilan énergétique*

Température de la terre.

IV) Émission de corps non noirs

1. *Émissivité*

Définition, dire que ça dépend de la longueur d'onde. Flux rayonné, cas où l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde, loi de Stefan modifiée.

2. *Loi de Kirchhoff*

Bilan à l'équilibre thermodynamique, on voit que l'absorption est égale à l'émissivité à une longueur d'onde donnée. Très fort ! On voit que les corps noirs sont ceux qui émettent le plus à une température donnée.

Application : vase Dewar, transformateur électrique (noir pour émettre le plus possible).

Conclusion : Ouverture sur les statistiques de Bose. Le photon est un boson... etc. Aussi sur les autres types d'émission.

LP17 : Phénomènes de transport

Bibliographie : tout-en-un PC/PC* ou PSI/PSI*, Diu de thermodynamique (très propre, à consulter pour TOUTES les définitions), Feynman électromagnétisme 1

Niveau : PC

Pré-requis : électrocinétique, électrostatique, thermodynamique de sup, cours sur les flux et les bilans

Introduction : On se focalisera sur transport thermique, mais transport de matière très proche, on fera des parallèles dès lors que ce sera nécessaire.

I) Lois du transport thermique*1. Types de transport*

Diffusion, convection, rayonnement (donner des définitions propres!), cas des solides et milieux transparents, importances relatives, convection forcée (ventilateur) vs naturelle (air chaud qui monte), on supposera par la suite rayonnement thermique négligeable, un chapitre y sera consacré.

2. Thermodynamique légèrement hors-équilibre

Car il y a des flux, notion d'ETL qui permet de travailler et de définir les grandeurs.

Pas de convection pour suivre le programme.

3. Loi de Fourier

Expression, date, unité et signe de conductivité, phénoménologique, irréversibilité, dépendance en T, limites de validité (voir le Diu pour le cadre précis), OdG, parallèle avec Fick, historique (Fick s'inspire de Fourier, car phénomène très similaire), insister sur les quantités transportées ainsi que sur les mécanismes de propagation (chocs, particules elles-mêmes).

4. Équation de bilan thermique

ρ , λ , c_v homogène indépendant de T

Loi de conservation, explicitation des termes, schéma. On aboutit sur l'équation de la chaleur. Historique (série de Fourier).

Décompte des inconnues, équation sur n (rapide), cas sources nulles ou RP (partie II et III).

5. Analyse microscopique

À faire PROPREMENT, bien choisir ses mots, exemple sur Fick. Redire qu'ici ce sont véritablement les particules qui diffusent! Pas la même chose pour Fourier. Dire que c'est une démonstration heuristique!

II) Diffusion

Sources nulles donc.

1. Équation de diffusion

Cas thermique, généralisation, exemple de l'effet de peau ou de la diffusion de quantité de mouvement en hydrodynamique, phénomène irréversible ($dt \rightarrow -dt$, contenue dans Fourier), lent par rapport à la convection.

2. Exemple sur diffusion 1D

On chauffe très fort et très vite en un point (par exemple avec flamme), comment va évoluer le profil de température. Solution dans le tout-en-un dans le chapitre diffusion de particules. Tracé, largeur à mi-hauteur (rajouter la température du corps).

Citer que l'on retrouve exactement les mêmes résultats avec la marche au hasard.

3. Temps et longueurs caractéristiques

Raisonner avec OdG, caractéristique générale, exemple de sucre dans café.

III) Étude du régime permanent*1. Équations du RP*

Cas avec source. Citer l'analogie avec l'électrostatique et tous les problèmes faisant apparaître un laplacien nul (champ de vitesse irrotationnel).

Cas sans source. Conservation du flux. Électrocinétique.

2. Cas sans source, électrocinétique

Barre de fer avec deux thermostats, schématisation 1D. Flux constant, profil de T. Lien avec la conduction électrique et conservation de la charge. T donne V et ϕ donne I.

3.* Résistance thermique

Introduction très générale. 1D + effets de bords négligés.

Association, exemple sur une fenêtre avec air. OdG simple, double vitrage.

4. Cas avec source, électrostatique

Feynman, électrostatique 1 p 297.

Ici terme de source, on est donc en électrostatique $\Delta T = -\frac{\rho_s}{\lambda}$.

Différence : V est défini à une constante près tandis que T ne l'est pas !

Application à l'étude d'un point chaud. CLs ?

En $z = 0$, $\vec{j}_Q \cdot \vec{u}_z = 0$ donc $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$.

En $z < 0$, r tend vers l'infini. T tend vers T_0 .

"Si on a les mêmes CLs ça marche par unicité du théorème de Poisson."

On place donc une "charge" dans la partie supérieure ainsi $V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2} + V_0$.

Bref, on aboutit sur $T(M) = T_0 + \frac{\rho_s}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + \rho^2}}$

Graphe, équi-température. OdG.

5. Effet de cave

Conclusion : Phénomènes de transport très généraux.

Diffusion : irréversibilité et distance caractéristique de l'ordre de \sqrt{Dt} .

RP : électrocinétique ou électrostatique.

Idées importantes : des phénomènes régis par les mêmes lois ont des résultats similaires. Important de bien les identifier. Phénomènes de transports importants pour cette raison. Regroupe des phénomènes a priori très différents par des lois similaires.

LP20 : Induction électromagnétique

Bibliographie : Physique - Pearson "Tout-en-Un" MPSI/PTSI/PCSI. BFR Induction. BUP 822 Chute freinée. Tout-en-Un PSI/PSI* et Tout-en-Un SUP 2013 (spire qui tombe)

Niveau : CPGE **1ère année**

Pré-requis : Champ magnétique. Forces de Laplace (actions sur une spire ou un aimant).

Introduction : Historique, Faraday cherchait le lien entre le champ magnétique et les courants. Rien ne fonctionnait sauf lorsqu'il éteignait ses circuits. C'est aussi ce que l'on observe quand on a une boussole et qu'un orage tout proche éclate!

Mouvement d'un aimant à travers une spire : expérience à l'oscilloscope.

→ Variation du flux magnétique à travers le circuit qui provoque l'apparition d'un courant. C'est l'induction magnétique!

I) Induction EM

1. Exploitation de l'expérience introductive

Schéma. Définition du flux.

2. Loi de Faraday

Énoncé. Dire que l'on pourra la démontrer l'année prochaine grâce à une formulation générale de l'EM (savoir le faire, ils le demanderont).

Équivalent électrique. Prendre son temps pour tout poser proprement. Discussion.

3. Loi de modulation de Lenz

Expliquons le signe moins dans la loi de Faraday.

Chute d'un aimant à travers une spire, voir le BUP.

Mise en évidence de courant induit. Énergétique, dire qu'il y a dissipation par effet Joule.

Application à la chute d'un aimant. "Force de frottement fluide." Freinage par induction.

Faire de façon qualitative.

II) Conducteur mobile dans un champ magnétique stationnaire

1. Rails de Laplace

Étude exhaustive. Insister sur la démarche. Présenter en mode alternateur. Attention, on néglige l'auto inductance.

2. Spire qui tombe dans un champ magnétique constant – Mixe des deux Tout-en-Un

Aboutir sur la notion d'auto inductance car on a oublié le flux créé par la spire sur elle-même (flux extérieur + flux intérieur). Cela fait la transition.

III) Inductance propre

On prend pour commencer le cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps.

1. Auto-induction – suivre le bouquin de Sup.

Circuit indéformable. Flux propre.

Loi d'Ohm généralisée avec inductance cette fois-ci. D'abord sans champ extérieur, ensuite avec.

Énergétique. D'abord par l'inductance, puis dire que l'on verra que cela correspond à l'énergie magnétique à l'intérieur du circuit. Faire les calculs pour un solénoïde. Continuité énergie : application aux bougies de voiture.

2. Retour sur la spire qui tombe

Dire que l'auto-induction est générale et pas seulement pour un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps.

IV) Inductance mutuelle

1. Principe et propriétés

Discussion sur le couplage, canaliser les lignes de champs magnétiques.

2. Applications

Transformateur parfait. Transport HT. Aussi pour la recharge des nouveaux téléphones (échange d'énergie électrique sans contact).

Conclusion : On démontrera la loi de Faraday l'année prochaine, qui ouvrira sur une nouvelle interprétation. Ouverture sur la conversion électromécanique, les circuits magnétiques.

LP21 : Résonance magnétique nucléaire

Bibliographie : Imagerie de résonance magnétique, de Michel Décorps. Canet RMN. Tout-en-Un PC-PC* de chimie pour la spectroscopie RMN. Le Bellac.

Niveau L3

Pré-requis : Mécanique classique (équation précession). Bases de mécanique quantique et de physique statistique.

Introduction : Au départ, investigation purement théorique. Concept, premiers tests élaborés en 1945 par des physiciens. Aujourd'hui utilisée dans des domaines très variés, usage démocratisé malgré la complexité technique. Médecine, industrie, chimie, biologie...

I) Moments magnétiques et Aimantation

1. Moments magnétique nucléaire

Spin du noyau. Ici RMN et non Résonance Paramagnétique de l'Électron.

$$\mu = \gamma S \text{ avec } \mu_p = \hbar e / 2m_p$$

Facteur de Landé de 5.58 pour le proton à comparer au 2 de l'électron.

Quels noyaux ont des moments magnétiques non-nuls, et donc sur quels noyaux pourrons nous faire de la RMN ? On se concentrera sur la spectroscopie de proton, mais il y en a plein d'autres.

2. Interaction avec un champ magnétique

Dégénérescence par effet Zeeman.

Énergie d'interaction, fréquence de transition, OdG des fréquences pour les noyaux étudiés (bien préciser la valeur du champ magnétique associée).

3. Aimantation macroscopique

Statistique de Boltzmann, OdG, on aura des décalages tout petits, aimantation macroscopique et loi de Curie. (Faire le calcul pour spin 1/2 et donner la formule pour les autres cas.)

Maximiser M ! : Techniques de matière condensée, on a donc beaucoup d'atomes. On aura cependant à descendre le plus possible la température pour avoir un signal le plus fort possible, d'où l'intérêt de travailler à la température de l'hélium.

But de la RMN, on va décaler cette polarisation de spin avec des champs transverses, et voir comment on peut en obtenir des informations sur la matière qu'on étudie.

La fréquence associée à chaque retour à l'alignement **va dépendre de l'environnement électronique** car le champ ressenti est blindé !

II) Mouvement dans un champ magnétique

1. Précession libre

Équation de précession : faire le calcul classique, on sait que c'est un mouvement de précession, pulsation caractéristique. Parler dès maintenant de la relaxation, au bout d'un temps donné

2. Application d'un champ tournant

Présentation (décomposition du champ tournant en deux composantes, une seule servira)

On se place dans le repère tournant, résolution.

Cas particulier, si le champ tournant tourne à la fréquence de rotation du au premier champ, on va pouvoir faire tourner le moment magnétique autour du champ tournant. Impulsion $\pi/2$, OdG de τ et ω_r

3. Réalisation pratique

On rappelle qu'on envoie un champ polarisé rectilignement par division en deux polarisations circulaires, seule une tourne à la vitesse de précession due au premier champ, et a une efficacité non négligeable.

On pourrait aussi envoyer un champ à une seule fréquence, et tout tester au fur et à mesure, mais **on va envoyer un pulse, qui va contenir plein de fréquences, et on aura alors toutes les résonances en même temps**, ce sera beaucoup plus facile à traiter et rapide.

Transition : on voit que nos noyaux ne résonnent qu'à une seule fréquence, qui est due à leur rapport gyromagnétique, mais aussi à leur environnement proche qui va jouer sur le champ magnétique qu'ils vont voir.

En testant cela, on va pouvoir avoir des informations sur les noyaux. C'est ce qu'on va essayer de faire. Mais pour pouvoir détecter les résonances, il va falloir avoir des informations sur la relaxation qui a lieu

une fois que le moment magnétique a été déplacé.

III) Relaxation des moments magnétiques

1. Différentes relaxations – Voir chapitre dédié du *Canet*

Présenter les deux types de relaxation, spin-réseau et spin-spin, et comment on va les modéliser. On prend un modèle simple et phénoménologique (frottements fluides!). Comparaison entre les deux temps de relaxation.

2. Équations de Bloch

On prend ceux deux relaxations en compte, et on écrit les équations de Bloch.

On pourrait les démontrer à partir de la mécanique quantique, mais ce n'est pas nécessaire pour comprendre le phénomène ici. Attention, il est impératif de noter que **les équations de Bloch décrivent l'évolution de l'aimantation du système**, mais pas d'un seul moment magnétique! On peut alors écrire la forme générale de la relaxation. En pratique ce n'est pas simple, et on fait pas mal d'approximations.

3. In homogénéités de champs

Nouveau temps caractéristique à prendre en compte, donc nouveau temps caractéristique. Mais on n'entrera pas dans ces détails techniques.

Ce qu'il faut savoir, c'est qu'on va introduire un nouveau temps caractéristique. En pratique, il y a plein de bobines de corrections, et tout un travail est fait sur l'homogénéisation du champ, pour avoir des précisions de l'ordre de un pour un million, et plus encore.

On note que la façon la plus précise pour tester l'homogénéité du champ est ... de faire une RMN.

4. Mesure

On a une une fém créée sur des bobines judicieusement disposées, car des moments magnétiques tournants vont donner des effets inductifs. Il y a bien sûr beaucoup de considérations d'électronique à faire pour optimiser le rapport signal sur bruit, et avoir un signal le plus précis possible, car il est très petit; on n'entrera pas dans les détails.

On fait aussi beaucoup de mesure successives afin de pouvoir moyenner. On est dans la génération de la RMN impulsionnelle.

Puis TF.

IV) Déplacement chimique et spectre de RMN – *Tout-en-Un PC/PC**

1. Blindage et constante d'écran

Origine, cela permet d'identifier de manière unique chaque noyau.

2. Déplacement chimique

C'est la façon qu'on les RMN-istes de représenter les spectres, définition, réaliser la précision importante, qui demande une précision à cet ordre pour toutes les considérations.

Le spectre est obtenu par transformée de Fourier du signal reçu, on n'entrera pas dans les détails techniques. Nécessité d'une référence, exemple du TMS pour la spectroscopie du proton. Montrer un joli spectre, on voit qu'on a des séparations de raies, c'est du au ...

3. Couplage spin-spin

Présentation, interaction dipolaire et scalaire, OdG, portée, analyse sur un spectre.

4. Applications

On vient de voir la spectroscopie RMN. Présentation d'un module de RMN de chimiste.

D'autres des domaines d'applications, physique (ordinateur quantique), biologie (grosses molécules, test dopage), médecine (IRM, développer ce point grâce au *Le Bellac*).

LP24 : Ondes progressives, ondes stationnaires

Niveau : CPGE 2^{ème} année.

Prérequis : Électrocinétique, Mécanique, EM du vide.

I) Onde et équation d'onde*1. Corde vibrante*

Système, notations, hypothèses (petits angles, pas de dissipation, gravité négligée, déformation transverse).

Équation d'onde sur y .

Rapidement donner l'énergie cinétique linéique et l'énergie potentielle.

2. Onde, équation d'onde

Onde : grandeur complexe réelle, vectorielle, scalaire, dépendant de \vec{r}, t satisfaisant l'équation d'onde.

Équation d'onde : "couplage ∂_x et ∂_t ". Réversibilité. Elle peut être non-linéaire. Connaître l'onde c'est avoir des informations sur le milieu. Exemples sur transparent.

3. Équation de d'Alembert

Linéaire, réversible. Terme dimensionné à une vitesse. On verra que c'est la vitesse de propagation.

Exemple sur transparent du câble coaxial.

Évoquer l'électromagnétisme du vide et l'acoustique.

Elle est valable pour de nombreuses quantités physiques (retour sur la corde : vitesse position tension etc.)

Expliquer pourquoi elle est si générale : c'est la premier ordre (DLs évidents sur la corde, on a négligé la dissipation pour le coax, DLs en acoustique, exact pour EM vide).

4. Conditions limites. Conditions initiales.

CI : données sur toute l'onde à un temps donné.

CL : fixe en tout temps la valeur de l'onde ou de ses dérivées en des points donnés.

Exemples : corde frappée, pincée pour les CIs et anneau (dérivée) ou Melde (position) pour CLs.

II) Ondes progressives*1. Onde plane progressive*

Onde plane : $s(\vec{r}, t) = s(x, t)$. Même état vibratoire sur un plan.

Attention, onde plane n'a de sens qu'en milieu 3D.

Factoriser l'opérateur d'Alembertien.!

Onde plane progressive. Dessin de la perturbation qui progresse.

2. Onde sphérique progressive

Résolution.

3. Base de solution

Linéaire on peut additionner les solutions. Les ondes planes et sphériques forment une base complète de solution.

Ondes planes adaptées aux équations différentielles. Ondes sphériques adaptées à la réalité des sources physiques.

III) Propagation et grandeurs couplées : notion d'impédance*1. Grandeurs couplés*

Rendre à César ce qui est à César : les véritables équations d'onde sont le système d'équa. diff. couplé avec les grandeurs couplées associées.

Formalisme matriciel. D'Alembert n'en est qu'une conséquence (déterminant).

2. Notion d'impédance

Attention que pour un milieu LHI.

Dire que deux grandeurs caractérisent le milieu et que deux autres caractérisent l'onde. Parfaite correspondance.

3. Interface entre deux milieux d'impédance différents : coefficient de Fresnel

Deux cordes avec choc. Onde transmise, réfléchi.

Utiliser la continuité des grandeurs couplées.

Coefficients de réflexion de transmission. Généralité de ces résultats.

Expérience : Adaptation d'impédance concernant le coaxial. "Un milieu fermé sur son impédance se comporte comme un milieu infini."

5. *Considérations énergétiques*

Récapitulatif, transparent. Ondes EM, coax, corde, son.

Grandeurs couplées, vitesse, impédance. Énergétique.

Équation générale de la conservation de l'énergie.

IV) Ondes stationnaires

Milieu fermé. Rebonds. Si on tape régulièrement, les ondes vont se chevaucher, se superposer.

Autre possibilité, si la déformation initiale a une taille caractéristique de l'ordre de grandeur du système.

1. *Définition* Expérience de Melde : découplage temps espace. $\rightarrow s(x,t)=f(x)g(t)$

Résolution d'Alembert, base stationnaire. Décomposition stationnaire somme deux propagatives (revenir aux rebonds).

2. *Conditions limites*

Corde de Melde. Résolution. Noeud, ventre.

Guitare, dissipation par frottement avec l'air.

3. *Énergie d'un mode*

On arrête le forçage.

$E = \sum E_n$ Linéarité due à Parseval et à l'orthogonalité de la base des ondes stationnaires.

OPPM et l'onde stationnaire associée ne sont que des bases. Dans la réalité, les ondes sont des superpositions de ces éléments de base.

D'Alembert est restrictive. Dans la réalité les équations sont bien plus compliquées. Il y a de la dispersion !

LP25 : Ondes acoustiques

Bibliographie : Tout-en-Un Dunod PSI/PSI*. Tec& Doc PC/PC* Gié. Ondes mécaniques et diffusion – Garing.

Prérequis : Ondes progressives (notamment impédance, relations de Fresnel).

Introduction : Dire que le choix se porte ici d'étudier les ondes sonores dans les fluides. Plus grande généralité.

I) Modèle des ondes acoustiques

1. Équations dynamiques et thermodynamiques

On a N.S., la conservation de la masse et après dénombrement des inconnues, il faut aussi une équation thermodynamique. On sous entend par ce dénombrement que s est découplé du problème, c'est-à-dire que $\rho(s, P) = \rho(P)$. C'est l'approximation barotropique.¹⁹

2. Linéarisation des équations : approximation acoustique

Le fluide est supposé parfait (isentropique, c'est-à-dire adiabatique réversible : pas de transferts de chaleur, pas de viscosité) et on néglige la gravité.

État d'équilibre (P_0 , ρ_0 et vitesse nulle).

Expérimentalement, on observe que lorsque des sons existent, il y a des surpressions de l'ordre de 3.10^{-5} Pa à 30 Pa.

On va donc faire un traitement par perturbation autour de l'équilibre. Les variations de pression seront accompagnées de variations de densité et v caractérisera la vitesse d'une particule de fluide.

Autrement dit : variables adimensionnées seront infiniment petits d'ordre 1. Quid de v_0 pour l'instant ?

On verra plus tard ?

Linéarisation des équations. On a besoin d'un coefficient reliant ρ à P . On linéarise, on sait que l'on est isentropique c'est donc χ_S qui est nécessaire.

On clôt le système que l'on exprime sous forme couplé. On écrit l'équation de propagation. On précise que le v_0 vaut ... et qu'on l'appellera par la suite c_s .

Remarque : rien ne dit qu'on a une évolution isoT.

3. Célérité du son

Expressions pour les gaz, liquides et solides. Voir le Tout-en-Un. Bien dire que pour les solides, le modèle précédent n'est pas valable, il faut travailler avec des chaînes d'oscillateurs.

II) Propagation des Ondes sonores

1. Ondes acoustiques planes progressives

Équation d'Alembert. Formalisme de l'onde acoustique plane progressive. Impédance, vitesse, caractéristique du milieu etc...

2. Aspects énergétiques

e, II. Équation locale de conservation de l'énergie.

Intensité sonore, décibel.

3. Retour sur les approximations

OdG. Approximation de Mach. Viscosité. Diffusion thermique (dire que l'hypothèse d'adiabaticité est de moins en moins bonne quand la fréquence augmente).

III) Réflexion et transmission d'ondes sonores

Dioptré avec c , Z différents de chaque côté.

1. Conditions aux limites

Continuité de la vitesse et de la surpression.

2. Coefficient de réflexion et transmission

Direct avec Fresnel. Faire en puissance également.

"Une interface ne transmet correctement les ondes sonores que si les impédances de part et d'autres sont voisines."

C'est l'intérêt des pavillons. Aussi du double vitrage.

19. A passer potentiellement sous silence, mais à garder en tête.

3. Ondes stationnaires

Tuyaux sonores. Ventres et nœuds. Facile pour une cavité complètement fermée
Mais par contre comment se comporte un tuyau ouvert sur l'extérieur ?

4. Modèle de la sphère pulsante, impédance des ondes sphériques

Tec&Doc Gié PSI/PSI*

Conclusion : Ondes sonores dans les solides. Propriétés élastiques des solides. Modèle des oscillateurs couplés. Approximation du continu. Module d'Young.

LP26 : Propagation dans un milieu dispersif

Bibliographie : BUP648

Introduction : Manip du prisme. Comportement fréquentiel différent.

I) Phénomène de dispersion

1. Définition

On dit qu'un milieu est dispersif dès lors que la vitesse de chaque composante monochromatique dépend de sa fréquence. Le paquet d'onde, défini comme la somme d'OPPM, verra donc sa "forme" évoluer.

Expérience : prisme, comportement différent pour chaque longueur d'onde. Remarque sur le laser, presque une OPPM mais extension spectrale également.

2. Décomposition en OPPM

Linéarité des équations de Maxwell.

Solution générale : $s(z, t) = \iint_{-\infty}^{+\infty} S(\omega, \vec{k}) \exp i(kz - \omega t) d\omega d\vec{k}$

On veut simplifier cette expression. N'avoir qu'une intégration à faire : obtenir une relation $k = k(\omega)$

3. Relation de dispersion

De l'équation d'onde, on remonte à la relation de dispersion souhaitée.

Une relation typique provient de l'équation d'onde d'Alembert.

On a $k = \omega/c$. Vitesse de phase. Ici toutes les vitesses de phase sont identiques. Milieu non dispersif.

Relation de KG. Calcul de la vitesse de phase.

Loi de Cauchy : retour sur l'expérience introductive.

II) Signaux physiques

1. Paquet d'onde

Réécriture de $s(z, t)$. On veut localiser l'information dans l'espace et le temps.

Il ne peut plus être monochromatique car $\Delta\omega\tau = 1$.

Exemples : $S(\omega)$ Dirac, Diracs, gaussienne, porte...

2. Vitesse de phase

Où est localisée l'information ?

Prendre un spectre composé de deux ondes monochromatiques proches ou une porte de largeur donnée.

Remonter par DL à $v_g = d\omega/dk$.

3. Retour sur l'équation d'onde des plasmas

Calcul de v_g . Lien avec v_ϕ pour cette équation d'onde.

Petite animation sur Scilab.

4. Dispersion du paquet d'onde

Ondes de surface. Voir BUP 648.

III) Lien avec l'absorption

1. Vecteurs d'ondes complexes

k' et k'' Écriture de l'exponentiel complexe.

Dire que l'absorption et la dispersion dans les milieux (en bulk) sont liées par les relations de Kramers-Krönig.

2. Équations des télégraphistes

La dispersion n'apparaît que lorsque l'on prend en compte les pertes par effet Joule.

IV) Conséquences et applications

1. Limitation du débit dans une fibre optique

Dispersion intermodale dans une fibre optique. Résolue par de la dispersion chromatique qui est de signe opposé.

2. Dispersion normale et anormale

$$v_g = \frac{v_\phi}{1 + \frac{\omega}{n} \frac{dn}{d\omega}}$$

Application aux signaux "superluminiques".

LP27 : Propagation guidée des ondes – MP

Introduction : Onde sphérique : vecteur énergie décroît en $1/r^2$. Lié à la conservation de l'énergie sur la sphère qui baigne dans notre espace tridimensionnelle.

Problématique car grande atténuation des signaux. Solution : changer la géométrie d'émission (antennes) ou mieux, contraindre la propagation des ondes.

I) Guidage d'onde

1. Présentation

But des guides. Confinement des ondes. Les "guider". 2D donne $1/r$ et 1D donne constant !

Exemples pratiques.

2. Confinement des ondes : conditions limites

Métal parfait, matériau dur, saut d'indice (réflexion totale).

3. Caractéristique : dispersion, atténuation

Imperfections du confinement responsables de l'atténuation le long du guide.

Coût, rigidité (fibre optique). Temps : dispersion, limitation du débit.

II) Point de vue ondulatoire

1. Guide d'onde rectangulaire EM

Dessin, hypothèses (métal bon marché recouvert d'une fine couche d'argent ou d'or \rightarrow métal parfait).

Dire onde centimétrique, donc guide d'onde de l'ordre du centimètre.

Définir les TE_{nm} et TB_{mn} . Ce sont des modes. La linéarité des équations de Maxwell permettra par superposition de remonter à toutes les solutions. On va s'intéresser à TE_{n0} .

2. Calcul du champ TE_{n0}

$\vec{E} = E(x, y) \exp i(kz - \omega t) \vec{U}_y$; propagation selon \vec{U}_z , monochromatique, polarisation selon \vec{U}_y

Remarque : Cela correspond exactement à la problématique de l'acoustique ! Si l'on fixe une polarisation, le champ E devient scalaire !

- On a MG, $\square E$ et CL pour obtenir le champ électrique.

- Esprit du calcul. MF donne ensuite B, équation de propagation donne relation de dispersion et donc vitesses de phase et de groupe, relations de continuité donnent charges et courants surfaciques. - Calcul, $\vec{E} \propto \sin(\frac{n\pi}{a}x) \exp i(kz - \omega t) \vec{U}_y$. Onde progressive selon z et stationnaire selon x. Schéma pour différents n. Plan nodaux. Mode n=1 est dit dominant. - Calcul de B par MF. B n'est pas transverse. (Préciser que pour un guide creux il est impossible d'avoir à la fois B et E transverses.)

3. Relation de dispersion

Calcul. Fréquence de coupure. Filtre passe-haut.

La taille du guide indique la fréquence "optimale". Si le guide est beaucoup plus grand que la longueur d'onde, celle-ci sentira un milieu infini. **Il faut un guide adapté à la longueur d'onde de l'onde que l'on veut propager !** Sélection d'un mode.

Calcul de la vitesse de phase, vitesse de groupe.

4. Aspects énergétiques

Calcul en TD, $\langle \Pi \rangle = \langle \omega \rangle v_g$. Ouf ! Pas d'atténuation dans le guide d'onde (modulo les imperfections).

Applications : radioastronomie 3MHz à 300GHz, transport du signal, cela ressemble à de la plomberie.

Problème avec les très grandes longueurs d'onde, il faut des récepteurs hétérodynes.

III) Point de vue géométrique

1. Fibre optique à saut d'indice – Houard, Optique. Taillet, Optique physique

Problématique, signal lumineux modulé pour transporter de l'information, a priori un laser ferait l'affaire (propagation unidimensionnelle) mais logistiquement impossible, il faudrait des miroirs dans tous les sens. Solution : fibre dans laquelle est confinée la lumière.

Utiliser les lois inhérentes aux ondes à savoir le principe de Fermat ou les lois de Snell-Descartes. C'est-à-dire la réflexion totale. Schéma + angle limite. $\cos \theta > n_2/n_1$

Schéma de dépliement. Interférences constructives \rightarrow Quantification des angles permis $\sin \theta_p = \frac{p\lambda}{2a}$.

Définition de fibre monomode, multimode.

Dispersion dans les fibres optiques. Intermodale : schéma qui va bien. Différence d'angle, différence de

temps de trajet pour les différents modes. Limitation du débit. Reliée à la notion de BP (dépend de la longueur de trajet). OdG.

→ Compenser. Comment ? Par une autre dispersion, l'intramodale ou dispersion chromatique (et aussi de polarisation). Fibre à gradient d'indice. Présentation. OdG de débit.

Applications : Transport information. Internet notamment. Fibre transatlantique. Il y a toujours de l'atténuation, nécessité de répéteurs optiques. Endoscope, gyroscope à fibre optique (on injecte de la lumière cohérente dans les deux sens de la fibre enroulée).

2. Interprétation des modes TE_{n0} par superposition

Somme de deux OPPM avec des vecteurs $\vec{k}_{\pm} = k\vec{U}_z \pm \frac{n\pi}{a}\vec{U}_x$ et $\cos\theta_n = \frac{cn\pi}{a\omega}$

Schéma + discussion : Pour le mode dominant, θ_n est le plus grand donc les contacts sont les moins fréquents, on en déduit que les pertes par effet joule (si conducteur non parfait) sont minimums.

3. Guide d'onde acoustique

Expérience où selon l'angle, on récupère tel ou tel mode.

Conclusion : Autres géométries. Travail aussi sur les signaux pulsés. Notamment le transport d'information par les solitons.

LP28 : Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

Bibliographie : Tout-en-Un PC/PC*. BFR 4.

Introduction : On vient d'étudier les OEM dans le vide. Malheureusement (pour la simplicité des calculs) ou heureusement (quel ennui ce serait) le monde n'est pas fait que de vide. De nombreux et variés milieux matériels existent. L'on va s'intéresser ici à l'interaction entre le champ EM et une catégorie de matériaux particulières que l'on pourrait décrire comme "isolants" (à opposer à conducteur ou semi-conducteur). Exemples : verre, céramique, téflon, huiles, air, diazote etc...

I) Milieu diélectrique

1. Charges libres, charges liées

C'est la notion à discuter lorsque l'on veut distinguer diélectriques et conducteurs. Définition des deux termes. Exemples : électron de la bande de valence d'un conducteur, électron élastiquement lié.

En réalité, tous les matériaux sont diélectriques, même les conducteurs.

Le caractère diélectrique est le "diamagnétisme du paramagnétisme".

2. Le milieu diélectrique

Milieu diélectrique : Milieu qui sous l'action d'un champ \vec{E} excitateur réagit par l'apparition d'une polarisation \vec{P} .

On verra cet effet si il n'y a pas de charges libres et on supposera que ce milieu n'a aucune propriété magnétique particulière $\mu = \mu_0$.

\vec{P} est le vecteur polarisation. Moment dipolaire par unité de volume. Petit dessin. Odg (Debye)

Origine : polarisabilité électronique, ionique, d'orientation. Faire le lien entre le vecteur polarisation et les charges et courants liés.

3. Équations de Maxwell dans les milieux

Champ à l'intérieur du matériau, champ incident + réponse du matériau.

On introduit le vecteur déplacement $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$.

On tire, on pousse on récupère les équations de Maxwell, on y rajoute finalement des charges et courants libres.

4. Équation constitutive

Dénombrement des équations, des inconnues. Pas suffisant.

Quelle est la forme de la réponse ?

Explication à la Feynman : on place un diélectrique entre les armatures d'un condensateur. $Q = CV \rightarrow C = \epsilon A/d$. Neutralité partout sauf en surface où il y a une densité de charge $\sigma_{pol} = P = Nq\delta$ donc par Gauss on a $\sigma_{libre} - P = \epsilon_0 E$. Heuristiquement, $P = \epsilon_0 \chi E$. On retrouve $C = \epsilon_0(1 + \chi)A/d$

C'est un indice pour supposer que la réponse du système au champ incident sera **linéaire**²⁰. $\vec{P}(t, \vec{r}) = \epsilon_0 [\chi(t, \vec{r})] \vec{E}(t, \vec{r})$

On passe en réponse fréquentielle, on suppose le milieu homogène. $\vec{P}(\omega) = \epsilon_0 [\chi(\omega)] \vec{E}(\omega)$

Isotrope en plus, $\vec{P}(\omega) = \epsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega)$

II) Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

1. Équation de propagation, relation de dispersion

On introduit ici la permittivité relative ϵ_r

Vecteur d'onde complexe $k = k' + ik''$

Indice réel, complexe.

Calcul de $\langle \vec{\Pi} \rangle$. Discussion de cette formule.

2. Dispersion et absorption

Absorption : $\langle \mathcal{P}_{cedee} \rangle = \langle \vec{j} \cdot \vec{E} \rangle = \epsilon_0 \omega / 2 \chi'' |E|^2$

Milieu transparent : $n_a(\omega) \ll n_r(\omega)$ Dispersion : $v_\phi = \omega / k'(\omega)$

3*. Relations de passage

4*. Réflexion et réfraction d'une onde plane à la surface de 2 milieux diélectriques, lois de Descartes

20. préciser que l'on se place dans un régime permanent, réponse "instantanée" du système à l'excitation

5. Biréfringence

Dès lors que l'on perd l'anisotropie. Application aux polaroïds.

III) Calcul de susceptibilité

1. Modèle de l'électron élastiquement lié

Calculs pour milieux dilués. Remarque : il peut être judicieux de ne pas prendre de forces de frottement car c'est inutile pour Cauchy qui arrive.

Milieux denses : modèle de l'électron élastiquement lié soumis à un champ E + Clausius Mossotti.

OdG de χ , 10^{-4} - 10^{-3} pour les gaz, 1-10 pour les liquides.

2. Application à la loi de Cauchy

3. Kramers-Kronig

Pourrait-on faire un milieu dispersion et non absorbant ? Non, χ' et χ'' sont reliés....

LP29 : Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs

Biblio : Tout en Un MP-MP*. Garing Ondes Em dans le vide et les milieux conducteurs. H-prépa, Ondes 2^{ème} année.

Introduction : Milieux conducteurs : métaux, plasmas, électrolyte, graphène.

I) Équations de Maxwell dans les milieux conducteurs

1. Énoncé
2. Équation de propagation

II) La conduction dans les métaux

On a besoin de relations constitutives qui lient le courant et la charge au champ EM.

1. Loi d'Ohm

Modèle de Drude (rapide et à l'oral). Chocs \rightarrow dissipation.

Objectif : lier \vec{j} et \vec{E} . Approche théorème II. Grandeurs pertinentes : n, e, τ , m. Dire le lien avec la résistance, analyse physique. OdG de n, m. Quid de l'OdG de τ ? On aurait besoin de connaître le mécanisme microscopique des chocs. Modèles simples : cations, impuretés, phonons? En fait ce sont les phonons.

Deux approches possibles, régime permanent, régime sinusoïdal. On veut des ondes donc le RP s'impose. PFD sur un électron.

On veut un champ uniforme sur le conducteur $L \ll \lambda$. De plus on sait que le champ magnétique est négligeable.

On aboutit à $\sigma(\omega)$. OdG.

2. Densité de charge dans le conducteur

Champ constant donne temps de relaxation σ_0/ϵ_0 . OdG.

MG + Ohm, nul sauf à pulsation plasma, ce qu'on supposera par la suite. (Ondes de plasma, oscillations longitudinales de la densité électronique.)

III) Relations de dispersion et Domaines spectral

1. Relation de dispersion

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(1 + i \frac{\sigma(\omega)}{\epsilon_0} \right)$$

On écrit $\vec{k}(\omega) = \vec{k}'(\omega) + i\vec{k}''(\omega)$. Dispersion, atténuation.

2. Domaines

Graphe qui va bien. Dénombrer trois pulsations caractéristiques. Nom des différents domaines. OdG.

3. Tableau récapitulatif

- Domaine spectral
- Relation de dispersion
- Équation différentielle équivalente. (Diffusion – dire irréversibilité et KG pour les plasmas)
- Nombre d'onde

IV) Domaine optique

1. Cas $\omega > \omega_p$

Propagation sans atténuation. Vitesse de phase et de groupe, lien entre les deux. Dispersion.

Cas limite ou la fréquence tend vers l'infini. Vecteur de Poynting, densité d'énergie électromagnétique, lien avec la vitesse de groupe. Pas d'énergie dissipée.

Coefficient de transmission quasiment égal à 1. (Exemple de la ionosphère, transparente aux visibles)

2. Cas $\omega < \omega_p$

Atténuation sans propagation, Poynting nul en moyenne (due au décalage de $\pi/2$), pas d'énergie dissipée. Réflexion totale. OdG : fréquences optiques!

Applications : miroir, blindage EM, guide d'ondes.

Dire que le champ électrique est quasi nul à la surface d'un métal puisque très près du nœud de l'onde stationnaire.

Interprétation avec les dipôles oscillants qui réémettent.

Pression de radiation.

V) Domaine ohmique

1. Forme des champs

Donner la forme des champs, épaisseur de peau, faire un schéma propre (décalage de $\pi/4$ de B par rapport à E), atténuation.

2. Effet de peau

Analogie avec la conduction thermique.

Conséquence pour les fils qui transportent du courant (courant pelliculaire). OdG cuivre.

Énergie dissipée.

LP31 : Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat

Bibliographie : Ondes lumineuses, Pérez d'Optique, BFR d'Optique.

Niveau : L3

Pré-requis : Optique géométrique, optique physique, électromagnétisme, mécanique Lagrangienne.

I) Le principe de Fermat

1. Milieu de propagation

Milieu linéaire et transparent.

Isotrope également car on ne travaillera pas avec des milieux biréfringents. (Spath)

HOMOGÈNE ? Pas nécessairement. On aura donc a priori un indice optique dépendant de la position dans le matériau.

Exemples de milieu de propagation : eau, air, verre. Expliquer quand il y a homogénéité. Ordre de grandeur des indices optiques.

De plus, l'échelle de variation de l'indice optique doit être très grand devant la longueur d'onde du rayon lumineux.

2. Rayon lumineux

Définition : "Vecteur énergie" c'est à dire le Poynting. C'est un quasi-cylindre de rayon très grand devant la longueur d'onde.

Il se déplace à une vitesse c/n .

3. Chemin optique

On veut construire une quantité qui traduit la "trajectoire" d'un rayon lumineux dans un milieu MLTI.

Construite à partir du temps de trajet. (Voir le petit schéma de Jemy.) On a ensuite $(AB) = \int n ds$

Écrire le chemin optique aussi sous la forme $(AB) = \int n v_\phi dt$

4. Principe variationnel de Fermat

Le trajet effectivement suivi par la lumière de A à B correspond à une valeur stationnaire (extrémale) du chemin optique par rapport aux chemins voisins.

La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée soit localement minimale.

Dessin (AMB) et (AM'B). Dire en substance que cela revient à $dL=(AM'B)-(AMB)$ est un ordre 2 en dM .

Question, il faut désormais lier le chemin optique aux variations du gradient d'indice.

II) Application à des milieux homogènes

1. Propagation dans un milieu rectiligne

C'est une droite. On a aussi le retour inverse de la lumière.

Noter que ce n'est en fait que l'écriture du fait que la géodésique d'une espace homogène est une droite.

2. Interface entre milieux

Lois de Descartes, démonstration de la réfraction, puis énoncé direct de la réflexion (le travail a en fait déjà été fait).

Si il y a simplement un dioptre on retrouve le problème du maître nageur.

Parler des réfractions et réflexions limites.

Construction de Huyghens.

3. Lentille et image

Pour montrer que l'infini converge sur le foyer, cela revient au même faire la démonstration avec les lois de Descartes, ou de dire que le chemin optique est le même.

Lentille plan-convexe, on peut faire la petite application rapide au premier ordre par l'équation de la lentille ou utiliser la construction de Huyghens. Et montrer le caractère astigmatique.

Aboutir sur les conditions de Gauss de l'optique géométrique.

III) Le Théorème de Malus – BFR

1. Surface d'onde

Définition, cas sphérique, plane, lien avec la formation d'image, les rayons parallèles, et les rayons émergents ou convergent à partir d'un point.

2. Théorème de Malus

Énoncé, démonstration, retour sur la formation d'image par les lentilles, importance pour faire le lien entre le vocabulaire de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire

3. Lien avec l'optique ondulatoire

Notion de surface d'onde et de surface équi-phase, lien entre le vecteur d'onde et les plans de phase, entre celui-ci et Poynting. On voit donc que Fermat permet de tout redémontrer, puisqu'il donne Malus, mais contient une partie de l'optique ondulatoire, c'est magique.

IV) Interprétation variationnelle

1. Formulation Lagrangienne

De $(AB) = \int n v_\phi dt$ on arrive à l'équation des rayons $\vec{grad} n = d n \vec{t} / ds$

Remarque sur l'eikonale : on peut retrouver cette formule en partant de la véritable théorie de la lumière qu'est l'EM.

Préciser l'autre formulation avec le rayon de courbure. Discussion : la lumière se courbe vers les zones d'indice fort.

2. Milieux homogènes

On retrouve la propagation rectiligne. On retrouve aussi les lois de Descartes, mais c'est ici bien plus fort en pratique, puisqu'on n'a pas besoin d'avoir deux points, mais juste un bout de rayon. Fermat peut donc s'écrire en infinitésimal et contient encore plus de choses que ce qu'on a pensé en dérivant les lois des Descartes.

Faire sentir qu'on pourrait aussi les démontrer en prenant simplement un rayon incident. C'est trop fort !

3. Mirages

Faire le début du calcul, on se ramène à l'équation de la chaînette !

On connaît alors la solution, on l'a déjà fait en mécanique analytique, on peut avoir les principaux résultats physique : la trajectoire du rayon en fonction des positions des objets, la hauteur géométrique à laquelle on voit l'objet (par dépliement propre du rayon lumineux), etc ...

Faire l'expérience de l'eau sucrée.

4*. Autres illustrations

Réfraction atmosphérique au zénith. Fibre à gradient d'indice.

Conclusion : Principe de minimisation. Ouvre sur la déviation de la lumière par les masses. Expériences d'Eddington. Géodésiques. RG. Équation de la lentille gravitationnelle. Péter un verre à pied et montrer que les anneaux d'Einstein. On a converti un retard du à la courbure de l'espace temps en un retard par indice optique.

LP32 : Interférences à deux ondes en optique

Bibliographie : Tout-en-Un SPÉ. Sextant. Ondes lumineuses.

Niveau : CPGE 2^{ème} année

Pré-requis : Physique des ondes, optique géométrique.

Introduction : On va parler d'interférences en optique, mais on a l'impression d'en voir assez peu dans la vie de tous les jours. Quelles sont en pratique les conditions pour en voir.

I) Formule des interférences

1. Modèle scalaire de la lumière

La lumière émise par une source lumineuse peut être décrite par la propagation d'un champ scalaire noté $a(\vec{r}, t)$ associé à une polarisation \vec{e} qui l'on oubliera très rapidement (ce sera le modèle scalaire de la lumière)

Notation complexe. $\vec{E} = A \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t - \phi(t)) \vec{e}$

2. Notion d'éclairement

$$I \propto \langle \Pi \rangle \propto |a|^2$$

Faire le lien entre l'intensité physique et l'intensité optique.

Préciser que l'intensité optique est liée à un détecteur. Lui-même relié à un temps moyen d'échantillonnage et une résolution spatiale.

3. Superposition de deux ondes

$$I = I_1 + I_2 + 2\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 A_1 A_2 \langle \cos(\phi_1 - \phi_2) \rangle$$

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega_1 t + \Phi_1(t)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega_2 t + \Phi_2(t)$$

Remarque : on comprend pourquoi on utilise le modèle scalaire de la lumière, en effet la première et indispensable condition pour avoir des interférences est de considérer des ondes de même polarisation. Dès lors le modèle scalaire suffit pour décrire la lumière.

Insister sur le cos qui est caractéristique des interférences à deux ondes. (Fonctions d'Airy pour interférences à N ondes)

4. Définitions

Figure d'interférences. Ordre d'interférence.

Franges : Points tels que la différence de marche est constante. Frange brillante, sombre.

Contraste/visibilité.

II) Conditions d'interférences

1. Vibrations synchrones

Sinon somme des intensités.

2. Modèle des trains d'onde pour une source monochromatique

Caractéristique aléatoire de la phase dans chaque train d'onde. Ordre de grandeur des différents temps de cohérence.

3. Cohérence temporelle

Temps caractéristique de détection OdG. Au vu de la durée typique de variation de la phase et du temps d'intégration du détecteur optique, il est impossible d'utiliser autre chose qu'une source unique interférant avec elle-même.

Longueur de cohérence, dessins qui vont bien des cours de prépa.

OdG. Lumière blanche, laser, lampe spectrale.

Deux méthodes : division du front d'onde, division d'amplitude. Schémas.

Limite imposée : différence de marche plus petite que longueur du train d'onde.

4. Cohérence spatiale

Source étendue spatialement comme sources ponctuelles incohérentes, elles additionnent leur intensités, cela va créer du brouillage.

Cas de la division du front d'onde, limitation sur la taille de la source, non localisation des franges.

Cas de la division d'amplitude, localisation (ou non) des franges. Attention, on peut avoir non localisation avec division d'amplitude, si on utilise une source ponctuelle ! Par contre, la division d'amplitude permet

l'utilisation d'une source étendue.

III) Un exemple d'interférences à deux ondes : les fentes d'Young

1. *Trous d'Young*

Cas d'une source ponctuelle, présentation, cohérence temporelle, cohérence spatiale, non localisation des franges, formes exactes, formes approchée sur un plan éloigné. Déplacement du point source.

2. *Passage aux fentes d'Young*

Permet d'augmenter la luminosité sans perdre la cohérence spatiale sur une direction. Montrer qu'on a bien la condition d'interférence dans le plan, sommer les sources.

NB : ne pas parler plus que en le notant qu'on a un sinus cardinal sur le total, du à la largeur finie des fentes ; c'est de la diffraction et ça n'a rien d'intéressant pour la présente leçon.

Expérience : montrer tout ça avec une lampe à vapeur de mercure, du skill, et au fur et à mesure. Pour commencer la forme des interférences et la non-localisation.

3. *Éclairement par une fente de largeur non-nulle* De même il faut sommer les intensités. Cohérence spatiale. Faire le calcul en supposant les fentes infiniment fines. Montrer qu'il apparaît un terme en sinus cardinal de contraste. Normal. Cas qualitatif de la première annulation.

Expérience : fermeture de la fente, disparition de la figure d'interférence par annulation du contraste.

Application : détermination de la taille de Bételgeuse !

4. *Source polychromatique*

Vibrations de fréquences différentes, on somme les intensités.

Expérience : enlever le filtre interférentiel vert, passer au jaune.

Calcul sur la raie double. Généralisation qualitative à la transformée de Fourier du spectre, spectroscopie par interférence.

LP33 : Interféromètres à division d'amplitude

Bibliographie : Tout-en-Un. Sextant. Ondes lumineuses.

Niveau : CPGE 2^{ème} année

Pré-requis : Notion de cohérence, interférences à deux ondes, Interféromètre par division du front d'onde.

Nous venons de voir les conditions physiquement nécessaires pour obtenir des interférences. Celles-ci étaient liées à la notion de Cohérence.

On va maintenant essayer de VISUALISER dans la pratique ces franges. En se posant des questions pratiques :

- Où seront-elles ?
- Pourrait-on utiliser une source étendue pour accroître la luminosité ?
- Quelles seraient des applications possibles ?

Dans le cours précédent on a vu des interférences par le dispositif des fentes d'Young. C'était un dispositif à division du front d'onde. Cette leçon se focalisera sur l'autre dispositif interférentiel qu'est le diviseur d'amplitude.

I) Interférence par division d'amplitude

1. Cohérence spatiale

Faire le calcul de la différence de $\delta(M)$ suivant que l'on vient de S' ou de S , deux points de la source.

On aboutit sur $\Delta\phi_M = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{e}_1 - \vec{e}_2) \cdot \vec{SS}'$

Condition pour que les franges ne se bouillent pas : $\Delta\phi_M = 0$. Ce qui donne deux solutions :

- \vec{SS}' reste perpendiculaire à $(\vec{e}_1 - \vec{e}_2)$. C'est-à-dire que l'on remplace la source ponctuelle par une source filaire. Mais les conditions de finesse sont souvent très sévères.
- On prend $\vec{e}_1 = \vec{e}_2$. On peut donc prendre une source étendue !

2. Propriété des interférences par division d'amplitude

Propriété très intéressante, c'est de pouvoir utiliser des sources étendues sans perdre la cohérence spatiale, mais on a alors des interférences localisées (bien noter qu'on peut avoir en division d'amplitude des interférences non localisées si on utilise une source ponctuelle). Par la suite, on se restreindra à des sources étendues. Schéma de principe.

On a résolu le problème de la luminosité !

2. Franges d'égale inclinaison

Principe : $n_0/n/n_0$ avec observation soit en réflexion, soit en transmission, dépendant de comment est faite cette lame. On va observer des rayons de même vecteur d'onde, donc dans l'espace des k , soit à l'infini, et on a bien localisation des franges.

Peut être à deux ondes, si l'énergie n'est contenue que dans les deux premières ondes réfléchies ou transmises, ou par onde multiple, si elle est bien répartie. **Pour que le contraste soit optimal, il faut que les ondes aient bien la même amplitude**, ou en tout cas une amplitude proche, sinon il sera pourri. Chaque matériel est adapté à un type d'interférence, et il faut observer celle qui est adaptée.

Explication du nom : frange d'égale inclinaison et donc symétrie circulaire ! Il reste juste à calculer le déphasage en fonction de l'angle. Très utilisé en spectroscopie avec des lames connues.

3. Franges d'égale épaisseur

Principe, lame mince d'épaisseur variable, modélisation de la trajectoire du rayon, localisation des franges sur la lame, observation soit par réflexion soit par transmission.

Explication du nom : très utilisé pour obtenir des observations sur la lame. Bulles de savons, etc ...

4. Déphasage à la réflexion ou à la transmission d'une lame

Faire le calcul bien proprement là, on ne le fera plus ensuite, prendre des indices $n_0/n/n_0$. Bien le noter. Tout le travail est fait, on peut dérouler. Bien prendre en compte le déphasage de π pour les réflexions.

On aboutit sur $\delta = 2ne \cos r + \lambda_0/2$ pour la réflexion et $\delta = 2ne \cos r$ pour la transmission.

II) Interféromètre de Michelson

1. Présentation générale

Nommer, situer les différents éléments.

Deux montages.

2. Coin d'air

Dessin de principe. Position de S_1 et S_2 . En déduire par le schéma des hyperboloïdes la forme des franges. Montrer que le point d'intersection est proche des miroirs. En déduire le montage pour les visualiser.

Faire bouger la source, montrer que M ne bouge pas.

Calcul de la différence de marche (le taf est déjà fait !) Franges d'égale épaisseur.

Expérience : Mercure vert.

3. Lame d'air

Dessin de principe. Position de S_1 et S_2 . En déduire par le schéma des hyperboloïdes la forme des franges. Montrer que le point d'intersection est à l'infini. En déduire le montage pour les visualiser.

Calcul de la différence de marche. Franges d'égale inclinaison.

Citer les applications de Virgo et la fameuse expérience de Michelson et Morley concernant l'éther.

Test de la planéité et de la qualité des miroirs ou autres surfaces comme des filtres, des dichroïques, etc.

III) Le Fabry-Pérot

1. Autres diviseurs d'amplitude

Exemples (anneaux de Newton, Mach-Zender). On va s'intéresser au Fabry-Pérot. Qui est un interféromètre à ondes multiples (on a un nombre infini de division d'amplitude).

Utilisé pour fabriquer des filtres interférentiels et dans les Lasers.

2. Schéma de principe et Calcul

Incidence normale.

3. Finesse

4. Applications

Utilisé pour fabriquer des filtres interférentiels (incidence normale) et dans les Lasers. Spectromètre haute résolution (égale inclinaison)

LP34 : Diffraction de Fraunhofer

Introduction : On remet en cause les suppositions de l'optique géométrique. On passe à l'optique physique. La taille des objets et des éléments du système optique peuvent être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

Exp. : Fente + laser.

I) Principe de Huyghens-Fresnel

Dates, énoncé, domaine d'application (points pas trop proches de l'ouverture et inclinaisons pas trop importantes par rapport à la direction du faisceau incident.)

II) Diffraction de Fraunhofer

1. Approximation de Fraunhofer

Point source à l'infini.

Calcul de l'amplitude au point M avec comme hypothèses, petite pupille, petits angles.

Mise en exergue de $\frac{r^2}{\lambda D}$. OdG de l'infini pour une pupille de l'ordre de 1 cm.

2. Transformée de Fourier

Formulation en terme de différence de phase avec le vecteur d'onde.

Introduction de la fonction indicatrice qui n'est d'ailleurs pas forcément réelle. Transmittance. Objet de phase.

TF de la pupille!

3. La lentille

Retard induit par une lentille. Montrer que cela compense parfaitement le terme quadratique.

4. Montage expérimental

Laser, infini. Ou deux lentilles.

III) Formation d'image

1. Image d'une fente

Exp. : Fente

Calcul. Sinus cardinal au carré.

Exp. : Fentes séparées, fentes non séparées suivant la taille de la pupille.

2. Extension à la pupille circulaire

3. Critère de séparation de Rayleigh

OdG des séparations à l'aide des phares de voitures et des distances.

4. Échantillonnage optimal

Brèves remarques sur le critère de Nyquist appliquer aux pixels des capteurs.

Pas un soucis en photographie mais ça l'est en astronomie.

IV) Introduction à l'optique adaptative

1. Lentilles et aberrations

Présenter les premiers. L'image d'un point n'est plus une tâche d'Airy.

Notion de réponse impulsionnelle.

2. Correction par objet de phase

Base des Zernike. Exacte compensation.

3. L'atmosphère, un objet de phase dynamique

Turbulence. Speckle. Diamètre de Fried. Résolution effective.

4. Boucle de rétroaction

Analyseur de front d'onde. Résultats actuels.

Conclusion : Ouvrir sur l'optique de Fourier. Diffraction : lien entre le microscopique et le macroscopique.

LP35 : Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique
– L3

Bibliographie : Kittel (pour Bragg)

Introduction : On l'a vu dans le cours précédent, le phénomène de diffraction apparaît dès lors que les objets illuminés sont de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière. Ce phénomène gênant lorsque l'on souhaite former des images peut s'avérer utile pour sonder la matière. Ici la sonde c'est la lumière mais c'est surtout une onde de grandeur caractéristique λ . Dès lors que les structures que l'on veut étudier ont des grandeurs caractéristiques L , il suffit d'envoyer une onde de longueur d'onde proche de L .

D'autre part, dans le précédent cours l'on a seulement étudié la diffraction par des motifs uniques. Il est naturel de se demander quel serait la figure de diffraction par des motifs multiples. Un motif multiple que l'on connaît bien, c'est le cristal!

L'on est en droit d'espérer pouvoir sonder les cristaux à la fin de cette leçon et grâce à la diffraction de remonter à leurs propriétés.

I) Diffraction par des motifs jumeaux

1. *Position du problème*

2. *Démonstration*

Facteur de phase, facteur de structure. Bien dire que l'on peut regarder les deux indépendamment et qu'ils ne se parlent pas. Cf. les traits du réseau qui sont dégueulasses ou les lycopodes.

3. *Diffraction et transformée de Fourier*

II) Potentiel dispersif des structures périodiques

1. *Réseau plan*

Définition. Pupille diffractante.

2. *Résolution rapide*

Formalisme de Fourier. Graphe dans l'espace réel, dans l'espace de Fourier. Correspondance des distances caractéristiques.

3. *Intérêt dispersif*

Agit comme un prisme. Pouvoir dispersif (le relier à la multiplicité du motif). Ordre.

4. *Application à la spectroscopie*

Présentation du Monochromateur.

Citer le réseau blazé (maximum pas sur l'ordre zéro).

Transition : On vient d'utiliser la répétabilité d'un motif pour étudier la lumière (c'est-à-dire la disperser). On va maintenant faire l'inverse.

III) Sonder la matière

Bonne connaissance de la sonde, moins bonne de la pupille diffractante.

1. *Motifs identiques répartis aléatoirement*

Lycopodes. Surtout pour évoquer somme des intensités/amplitudes.

2. *Diffraction par des motifs 3D*

Formule de Bragg. Démonstration.

Adapté aux cristaux.

3. *Application*

La sonde. Électrons, neutrons. Température. Rayons X. Longueur d'onde de De Broglie.

Exp. : Diffraction par le graphite.

Exploitation aboutie de l'expérience. Base de la cristallographie.

Conclusion : Ouvrir sur la "diffraction" forcée. Sonar, échographie. Réseau de sources, on peut viser par des décalage de phases.

LP36 : Absorption et émission de la lumière

Bibliographie : Cagnac – Physique Atomique 1. Pérez – Quantique, fondements et applications.

Niveau : licence 3

Prérequis : Quantification de l'énergie. Corps noir et loi de Planck. Modèle de l'électron élastiquement lié.

Introduction : On connaît la lumière. On va ici voir comment elle interagit avec la matière. Production et influence. Première partie théorique, seconde concerne les applications.

I) Interaction Matière-Rayonnement

1. Modèle

Gaz d'atomes où plusieurs niveaux d'énergie sont accessibles.

Dessin avec les deux niveaux. E_1 , E_2 . N_1 , N_2 . Dégénérescence. Origine de l'excitation (chocs, agitation thermique, rayonnement EM)

2. Émission spontanée

Exp. : Spectre de Hg. Expliquer comment est faite l'excitation (décharge et chocs avec des électrons)

Schéma associé. Atome* \rightarrow Atome + photon. $\nu = \Delta/h$

Propriétés : isotropie, largeur de raie (haute pression (chocs, collisions inélastiques), basse pression Doppler puis Heisenberg)

Variation de population : loi de type décroissance radioactive. Introduction du coefficient d'émission spontanée. Sens physique de ce coefficient. OdG.

Mentionner que le coefficient se comprend également en terme de taux de probabilité de transition.

3. Absorbance

On suit la même description que pour le paragraphe précédent avec en plus :

Notion d'absorption fréquentielle. Mentionner la Lorentzienne. Le modèle de l'électron élastiquement lié.

Parler ensuite de la densité volumique d'énergie de la source. Et bien dire que l'on suppose que la source est "plate" sur le domaine d'absorption de la molécule.

Concernant le coefficient d'Einstein, bien dire qu'il semble monochromatique mais qu'il est intégré sur une plage de fréquence. Il dépend à la fois de l'atome considéré et de la source.

Intérêt de la caractérisation par Spectroscopie. Identification de l'hélium en étudiant le spectre solaire.

4. Émission induite

Pourquoi la supposer? Approche d'Einstein visant à clore le problème du corps noir. Relier la thermodynamique, la population des atomes et le rayonnement.

Dessin. Faire arriver N photons et en faire repartir $N+1$.

Même remarque que l'absorption concernant l'intégration sur une plage de fréquence.

Dire que les photons émis sont cohérents avec ceux incidents!

5. Bilan énergétique pour un système à 2 niveaux

Enceinte fermée, équilibre thermique. $dN=0$ blablabla...

On retombe sur la loi de Planck à condition que $g_2B_{21}=g_1B_{12}$ et Wien.

Remarque, impossible si l'on ne suppose pas l'émission induite.

II) Application aux LASERS et au MASER

On oublie la dégénérescence à partir de maintenant.

1. Problématique et objectifs

Émission induite vs Émission spontanée. Expression avec les populations ou avec le facteur de Boltzmann.

OdG pour visible et température ambiante. Pour centimétrique et température ambiante. D'où le MASER.

Aboutir à l'inversion de population. Ce qui revient à avoir des températures négatives. On veut $N_2 \gg N_1$.

2. Amplification d'une onde par un milieu

Aboutir au fait que $N_2 \gg N_1$ revient à avoir un milieu amplificateur.

3. Réalisation de l'inversion de population

Tri moléculaire pour le MASER

Pompage optique. Citer Kastler, nobel 1966.

Dire que c'est impossible avec seulement deux niveaux. On doit donc en avoir 3. Expliquer le principe.

Aboutir sur la condition sur le taux de pompage.

4. Réalisation pratique des lasers

Cavité Fabry-Pérot.

Pertes, gain du milieu en fonction de la fréquence, modes. Point de fonctionnement, gain/pertes en fonction de l'intensité dans la cavité.

Exemples de laser. A semi conducteurs. Saphir, He-Ne. OdG.

Conclusion : Ouvrir sur le refroidissement par LASER. On atteint les microK. Être conscient qu'il faut des lasers résonants qui ont une largeur de raie très fine. Savoir parler du Doppler. Et aussi quelle est l'utilité des atomes froids (horloge précise par exemple).

LP37 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon

"Ce sage pour qui rien ne bouge"
Paul Verlaine – *Ballade de la vie en rouge*

Bibliographie : Cagnac de physique atomique, Hladik Introduction à la Relativité Restreinte. Composition 2013 et correction. Tec&Doc MP/MP*. Le Bellac. Pérez de Méca Q

Niveau : BEP

Pré-requis : Mécanique quantique, physique statistique, électromagnétisme, mécanique classique

Introduction : Aspect ondulatoire de la lumière parfaitement reconnu depuis des siècles. Newton a évoqué la possibilité que la lumière soit affectée par la gravité. (C'est la cas, mais pour d'autres raisons...) Ce fut la première quantification de la lumière.

Puis, l'idée germa dans l'esprit d'autres physiciens notamment Hertz 1887. La lumière fut tantôt onde, tantôt corpuscule. Sans jamais pouvoir véritablement trancher. Finalement la mécanique quantique régla les problèmes. Dualité. Et même pour n'importe quelle particule.

On s'intéresse aux expériences attestant le comportement corpusculaire de la lumière : c'est-à-dire des expériences nécessitant le photon.

I) Approche historique de la notion de photon*1. Loi de Planck*

Donner la densité d'état sans calcul, en ré-explicant en deux secondes avec les mains comment on l'obtient. À présent, si on intègre sans quantifier l'énergie sur chaque fréquence, on n'obtient pas le résultat, on est obligé de quantifier l'énergie dans chaque longueur d'onde, première notion de photon, remarque sur l'apparition de la « **constante d'aide** »

Attention : n'est prouvée ici que la quantification des échanges entre le champ EM et la matière !

2. Effet photoélectrique – Cagnac

Description rapide : j'éclaire en rouge à 10000W ma plaque, il ne se passe rien, j'éclaire en bleu à 1mW, j'ai apparition d'électrons ! Descriptif expérimental rapide (se garder pour les questions si nécessaire, mais on n'a pas trop le temps pour ça dans cette leçon), et considération énergétique. Deuxième preuve que le photon est quantifié (une nouvelle fois indice encourageant, mais cela n'indique que la quantification des échanges matière rayonnement !)

3. Transition : très bien, (soit les échanges matière-rayonnement sont quantifiés) soit le photon est quantifié ? Mais quelles sont ses caractéristiques ? Masse, impulsion, énergie, spin, moment cinétique ?

II) Caractéristique du photon : impulsion et énergie*1. Énergie du photon*

On a la loi de Planck, et on voit que l'énergie est bien quantifiée en quanta $h\nu$.

Par la suite, on travaillera avec des ondes planes dans le vide pour montrer la correspondance. Densité volumique d'énergie, lien entre l'amplitude du champ et la densité volumique de photon à une fréquence donnée.

2. Quantité de mouvement du photon

On prend une onde plane qui arrive perpendiculaire à une surface absorbante ou réfléchissante, force de l'onde électromagnétique sur le plan. Si on suppose que ce sont des photons qui arrivent et s'absorbent ou se réfléchissent, on peut en déduire leur quantité de mouvement.

Citer la pression de radiation sur la queue des comètes. Refroidissement Laser.

3. Masse du photon – Hladik

Eq. de Maxwell modifiées. On aurait de la dispersion (mis en défaut par des supernovas ultra lointaines) et modification de la décroissance en $1/r^2$. Bref, impossible. Postulat de De Broglie.

Mais on connaît la masse maximale du photon.

4. Effet Compton

Le faire plus ou moins rapidement selon le temps qu'il reste !

Attention, il existe une interprétation Doppler de l'effet Compton !

Parler du fait qu'on a nécessairement deux photons qui sont créés lors d'une annihilation particule/antiparticule.

III) Caractéristique du photon : moment cinétique et spin

1. Moment cinétique du photon – Cagnac

Par calcul du couple exercé sur une lame biréfringente. Ne pas le faire ! Mais donner les principaux résultats. Sachant qu'on connaissait le nombre de photons incident, on revient au moment cinétique d'un photon. Test expérimentaux, ok !

2. Spin du photon

Par le calcul de Planck, on sait déjà que c'est un boson. Son spin sera donc entier.

Étant donné que le champ électromagnétique est un champ vecteur (en fait le potentiel, mais il décrit l'intégralité du champ), on peut en déduire que le spin est 1.

Cependant, le fait qu'on ait une masse nulle est un peu plus compliqué, et demande de faire de la TQC, qu'on ne fera pas ici. Mais le moment cinétique devrait pouvoir se calculer ici.

Pas de moment nul, car le photon est toujours en mouvement, il reste donc plus ou moins « \hbar » quand on projette sur la direction du mouvement, qu'on identifie à une polarisation circulaire droite et gauche. Dire qu'une onde transverse est en fait la somme de deux polarisations droites et gauches. Cependant, on ne parle plus de projection de spin mais d'hélicité.

IV) Du semi classique au quantique

1. Preuve de l'existence des photons – Pérez de Mécanique quantique Sodium vers lame réfléchissante. Deux photo-multiplicateurs. On regarde les coïncidences. Égale à 1 si onde. 0 si corpusculaire.

2. Dualité onde-corpuscule

Diffraction par photons uniques (fluorescence d'un seul atome).

On obtient arrivée des photons un par un pour former la figure d'interférence.

3. Complémentarité

On se place dans la MQ et on peut prendre comme fonction d'onde, à savoir densité de probabilité l'amplitude du champ électrique (faire pour des ondes planes transverses). On obtient alors le bon résultat dans l'explication quantique. Mais alors, comment l'interpréter finalement ?

4. Modes de vibration du champ EM – Cohen Tome 1, quantification du champ EM

Champ qu'on quantifie, on obtient une infinité quantifié de fréquence, qui tend vers l'infini pour un grand volume, d'oscillateurs harmoniques découplés. On peut alors faire une seconde quantification, et on voit que les **photons sont des excitations fondamentales du champ électromagnétique** (ne pas faire le calcul, cf oscillateur harmonique).

C'est une autre interprétation du photon ! Porteur de l'interaction EM !

LP39 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie

Bibliographie : Cagnac Tome 2. Cohen Tome 1. Le Bellac.

Niveau : 2nde technologique

Pré-requis : Bases de mécanique quantique : fonction d'onde, postulats, puits infini. Mécanique, étude du problème à deux corps.

I) Caractère historique de l'atome d'hydrogène

1. Atome d'hydrogène – Cohen

On a le noyau, l'électron, et une interaction coulombienne entre les deux.

Étant donné qu'on a un système de particule, on peut passer au formalisme de la particule réduite, dont on donne directement le résultat. OdG, on prendra la masse réduite pour être exact, mais en pratique on pourra considérer que le noyau est quasiment stable.

Hamiltonien du système.

2. Approche historique – Le Bellac

Expérience : Montrer les raies avec un réseau.

On observe des raies spectrales, les citer. Balmer 1885.

Pourquoi les niveaux d'énergie sont-ils confinés ? Si on a des trajectoires comme un système à deux corps normal, on doit avoir toutes les trajectoires possibles ?

→ Besoin d'une nouvelle théorie.

3. Modèle de Bohr

Il a quantifié le moment cinétique, résultats rapides, on voit que l'énergie est aussi quantifiée. Grandeurs caractéristiques qui apparaissent.

Mais, modèles plus fins nécessaires ensuite, orbites elliptiques de Sommerfeld, etc . . . Il fallait une nouvelle théorie, la mécanique quantique, qu'on va utiliser par la suite.

II) Interprétation ondulatoire du modèle de Bohr

1. Confinement dans un puits de potentiel infini

On veut comprendre $2\pi a = n\lambda$.

Rappeler le confinement dans un puits de potentiel infini. Hypothèses, équations continuité, analogie ondulatoire.

Dire qu'on peut d'ailleurs facilement généraliser à 3D en séparant les variables.

Mot sur l'énergie du fondamental (différence avec classique) et Heisenberg.

2. Conditions aux limites périodiques

C'était des conditions limites (réflexion sur "métal"). Pour Bohr, ce sont des conditions aux limites périodiques. La quantification correspond aux états revenant en phase après un tour.

III) Hydrogène et confinement de l'électron : résolution quantique

1. Potentiel central – résolution classique

On aboutit au potentiel effectif.

En classique, on connaît les différentes trajectoires, les citer, dire que si on est près des positions d'équilibre, on retrouve bien la trajectoire circulaire, lien avec Bohr.

2. Résolution en quantique

Pour le quantique, c'est un peu plus subtile, il faut vérifier qu'une description avec simplement la variable r est bien adaptée.

Pour cela, on vérifie les relations de commutation avec L^2 , L_z et H , on peut alors chercher sur des sous-espaces propres communs.

Introduction des harmoniques sphériques, blablabla, on arrive à l'étude d'une seule fonction radiale qui dépend des nombres quantiques des harmoniques sphériques.

Lien avec les probabilités de présences.

Faire un graphe²¹ des premières densités de probabilité de présence radiale et angulaire. Montrer que

21. Attention, contrairement à une erreur répandue partout, les fonctions d'onde doivent pour être représentées convenablement être exprimées comme le produit des fonctions radiales et des orbitales sphériques ; on a tendance à donner une image

l'électron est confiné.

Ceci est associé à la quantification de E selon les valeurs de l et m , dégénérescence, etc.

3. Récapitulatif et généralisation

Quantification de l'énergie directement liée au confinement dans un potentiel.

Pour l'atome d'hydrogène, l'énergie ne dépend que de n , il y a de la dégénérescence. Mais pour les atomes suivants, la dégénérescence est levée.

Grappe avec les différents niveaux. Retour sur le spectre de l'hydrogène.

On l'a fait pour l'Hydrogène. Mais généralisable à tous les autres atomes. Et aussi à tous les problèmes avec des forces centrales. Harmoniques sphériques très efficaces.

Bien garder en tête que **Quantification = confinement + dualité onde corpuscule!**

des orbitales comme la densité de probabilité, mais ce n'est pas suffisant ! Les représentations sont plus compliquées que des jolies lobes, et vraiment dessinables qu'en 2D par le commun des mortels (et surtout sur un tableau). Préférer un dessin de densité électronique à ces lobes assez sournois.

LP40 : Effet tunnel

Bibliographie : Cohen. Le Bellac. Éléments de physique nucléaire, Meyerhof. BUP 699 Microscopie à effet Tunnel. Les nouvelles microscopies, Aigouy.

Niveau : L3

Pré-requis : Mécanique quantique ondulatoire, équation de Schrödinger, courant de probabilité

I) Modélisation du problème*1. Présentation du problème*

Modélisation par une onde plane, potentiel carré en première approximation, étude 1D.

2. Analogie classique

Résolution, commentaire.

3. Équation de Schrödinger

Rappel, application à un domaine de potentiel constant, disjonction des cas $E > V$ et $E < V$.

4. Discontinuité du potentiel

Calcul par Schrödinger, montrer que tout est bien continu. Cas où la marche devient infinie.

II) Coefficients de réflexion et transmission, effet Tunnel*1. Résolution par les conditions aux limites*

Considérations physique. Ne pas faire le calcul et donner les résultats pour l'onde transmise et réfléchi.

2. Coefficients de réflexion et transmission en probabilité

Justifier sa forme par le courant de probabilité. T, R sont des rapport de flux – de probabilité/ de lumière.

Remarquer que $T+R=1$.

3. Effet Tunnel

Faire le DL pour avoir la forme plus simple à utiliser. Effet tunnel, OdG.

Analogie optique, mentionner l'expérience de l'onde frustrée à la base de la microscopie à champ proche.

III) Cas d'un potentiel quelconque, application à la radioactivité alpha –Meyerhof et Le Bellac*1. Potentiel quelconque*

Technique du découpage en potentiels carrés juxtaposés.

Échelle mésoscopique nécessaire. Définition des indices optiques. Réflexions multiples Forme de la solution.

2. Radioactivité alpha

Historique, présentation du problème, forme du potentiel

3. Résolution

Calcul. OdG. Généralisation à d'autres problèmes physiques.

IV) Microscope à effet Tunnel – BUP 699 et Le Bellac*1. Historique*

Idée d'utilisation, développement, très répandu maintenant, montrer une photo.

2. Concept

Faire un schéma clair, expliquer le fonctionnement. Asservissement de la position.

3. Caractéristiques techniques

Résolution sur les différentes directions.

LP41 : Fusion, fission

Bibliographie : Meyerhof. Valentin, Noyaux et particules. Physique Nucléaire de Le Sech et Ngô. Le nucléaire expliqué par des physiciens, Bernard Bonin. BUP L'énergie nucléaire et Perspectives de la fusion nucléaire contrôlée Ray, La physique par les objets quotidiens.

Niveau L3

Pré-requis : Notions sur les particules, description du noyau.

Remarque : S'efforcer de parler en MeV.

I) L'énergie du noyau

1. Cadre de l'étude

Rappel du noyau, ses composants, liaison par l'interaction nucléaire forte, sa taille, de petits OdG fun, notamment l'énergie de masse d'un proton et d'un neutron.

Petit mot sur la répartition des charges dans le noyau en fonction du rayon.

Cependant, quand on un noyau et qu'on le compare à la somme de ses nucléons, on constate une différence...

2. Énergie de liaison

Introduction par la différence de masse, graphe de l'évolution de B/A dans les noyaux réels, vallée de stabilité, etc.

Ok c'est cool, mais on voudrait pouvoir décrire cela proprement. Modèle ?

3. Modèle de la goutte liquide

Problème à $N+Z=A$ corps! Mais bien trop compliqué!

Présentation (portée finie, cœur répulsif), modèle semi-empirique, présentation de tous les termes, accords avec l'expérience, on comprend plus ou moins ce qui va se passer.

Limites de la goutte liquide, existence de nombres magiques...

4*. Modèle en couche et nombres magiques

L'avoir en tête, il y aura des questions dessus, ce n'est pas bien dur. Mais on s'éloigne un peu de la notion de fission-fusion pour détailler ici.

II) La fission nucléaire

1. Principe

Lien avec l'énergie de liaison, donner un ou deux exemples, considérations énergétiques.

Quels matériaux peuvent fissionner? Noyaux fissibles (neutron thermique) et fertiles (neutres rapides), nécessité de l'enrichissement nucléaire (on veut du 235 qui est fissile!, seuls les neutrons thermiques sont utilisables).

2. Principe des réacteurs nucléaires

Principe de la réaction en chaîne, neutrons et surface efficace, neutrons capturés, neutrons thermiques, modération hautement non-triviale.

Définition du facteur de multiplication, on le voudra $1 < k < 1.0075$.

Coefficient de criticité, neutrons retardés. Expliquer que tout l'art de construire une centrale chez soi est que le coefficient de criticité ne dépasse un que par les neutrons retardés, on peut alors sur des temps caractéristiques décents contrôler une centrale.

Combustible, barres de contrôle, Modérateur, Fluide caloporteur

3. Différents types de réacteurs

Les énumérer, nombre, énergie, utilisation selon les pays, ceux adaptés à une utilisation familiale, etc ...

Graphique-gaz – eau pressurisée – eau bouillante – surgénérateurs (neutrons rapides).

4. Un exemple de réacteur, les REP

Réacteur à Eau sous Pression.

5. Risque nucléaire et gestion des déchets

Three Mile Island 79. Tchernobyl 89. Fukushima 11

BUP. Il faudrait un réacteur poubelle!

III) La fusion nucléaire

1. Principe

Lien avec l'énergie de liaison, donner un ou deux exemples, considérations énergétiques (barrière coulombienne, nécessité de haute température).

Quels matériaux peuvent fusionner ?

2. Le soleil – Annexe du *Valentin*

Décrire la fusion dans le soleil, blablabla, OdG. Confinement assuré par la gravité.

3. Les étoiles

Mais, que se passe-t-il quand plus d'hydrogène ? Contraction, flash alpha, suite de fusions différentes, arrivée au fer, ok. C'est sur la poussière d'étoile.

Lien avec la nucléosynthèse primordiale.

4. Vers une fusion contrôlée

Source d'énergie importante, réalisation technologique actuelle.

Faible concentration : Tokamak. Ou haute concentration : Faisceaux de LASER.

Tore-supra. Jet. ITER objectif Rendement =10

LP45 : Paramagnétisme, ferromagnétisme. Approximation du champ moyen

Bibliographie : Pérez d'électromagnétisme. BFR électromagnétisme, milieux diélectriques et milieux aimantés. Trémolet, Magnétisme. Diu de Physique Statistique. Kittel.

Niveau L3.

Pérequs : Ensemble canonique. Diamagnétisme.

Manipulation Domaine de Weiss. Plaquette avec petits moments magnétiques.

Introduction : Dans la matière il y a des moments magnétiques soit de spin soit liés au moment cinétique orbital. La plupart du temps diamagnétique mais aussi des couches incomplètes. Ceci implique une aimantation magnétique en présence d'un champ B.

I) Cadre théorique

1. Susceptibilité magnétique

La relation constitutive permet de clore le système différentiel.

On définit $\chi = \mu_0 M/B$.

2. Moment magnétique électronique

Élément microscopique de base. Modèle de la spire. Rapport gyromagnétique.

Dire qu'on néglige le magnétisme nucléaire.

3. Moment magnétique de spin et moment magnétique total

$J=L+S$. $\mu=g\mu_B L$. Magnéton de Bohr μ_B .

$g=1$ si moment orbital, $g=2$ pour le spin.

4. Paramagnétisme et ferromagnétisme

Interaction avec un champ extérieur, et entre spin. Pour champ extérieur, on va s'aligner. Mais aussi entre spin. À comparer avec l'ordre de grandeur de l'agitation thermique.

Différence qualitative entre ferromagnétiques et paramagnétiques. On va étudier séparément les deux.

Noter dès maintenant qu'il n'y a ferromagnétisme que dans les corps solides. Pour paramagnétisme, on ne va s'occuper que de la susceptibilité en présence d'un champ extérieur. Pour le ferromagnétisme, on verra comment il est possible d'avoir une aimantation induite.

II) Paramagnétisme

1. Généralités

Présentation, définition. Équivalent de la polarisation pour les matériaux diélectriques.

Sous couche incomplète.

2. Aimantation

Approche canonique. Faire le calcul pour un spin 1/2. Dire qu'il y a levée de dégénérescence.

Aboutir sur la fonction $M(B)$. Calcul de la susceptibilité par le formalisme canonique.

Discussion sur la saturation. Citer quelques exemples de molécules paramagnétiques.

Généralisation pour des J supérieurs.

Courbes expérimentales.

3*. Désaimantation adiabatique

4. Paramagnétisme de Pauli

Revient à passer de la statistique classique de Maxwell-Boltzmann à Fermi-Dirac.

Pour un métal, $n = 10^{29} \text{m}^{-3}$ (type Alu ou cuivre), avec $S=1/2$ on devrait avoir une susceptibilité de 10^{-2} . Ce qui n'est pas le cas expérimentalement.

Tous les états hors ceux qui sont proches de la surface de Dirac ne peuvent pas changer de spin ! Seule une fraction d'électrons à la surface peut participer à l'aimantation.

Formules, dessin. Bien dire que l'on perd la dépendance en T ! et c'est conforme avec l'expérience.

Transition : Pour l'instant on a pas pris en compte les interactions spin/spin. On va le faire maintenant.

III) Ferromagnétisme

Quelques hypothèses : spin 1/2, $g=2$. D'où $\mu = \mu_B$.

1. *Énergie d'interaction dipôle/dipôle.*

Idée : amener vers l'approximation du champ de Weiss par des OdG.

Voir le calcul du Pérez.

2. *Approximation du champ moyen Trémolet et Kittel*

Augmentation du champ appliqué par un champ magnétique supplémentaire proportionnel à l'aimantation volumique. $B_W = \lambda M$

$$\mu_0 M = \chi_p (B_a + B_W)$$

$$\mu_0 M T = C (B_a + B_W) \text{ donc } \chi = \mu_0 M / B_a T = C / (T - T_c) \text{ avec } \chi_p = C / T$$

Donner l'OdG de B_W par λ par T_c qui est de l'ordre de 1000k.

Utiliser le formalisme du Trémolet (je préfère le vecteur excitation au champ magnétique).

Dire que tout ceci permet d'expliquer la température de Curie des ferromagnétiques et l'aimantation spontanée.

3. *Interprétation quantique du modèle de Weiss – Pérez et BFR4*

Le champ créé par 1 spin sur son voisin est de l'ordre de 0,1 T. Ce qui est incompatible avec B_w . Comment résoudre le problème ?

Solution : Heisenberg en 1929. "Couplage entre spins voisins par l'intermédiaire des fonctions d'onde électronique (interactions d'échange)"

Formule. Parler du signe de J et des antiferro.

*Lier J à T_c . Revenir au bon OdG pour B_w .

Bien dire "c'est une situation où une interaction à très courte portée conduit à de proche en proche à un ordre à grande distance".

4. *Domaine de Weiss*

Taille caractéristique (kT vis-à-vis de l'interaction d'échange ?) Taille des parois. Illustrer l'équilibre entre interaction d'échange et d'anisotropie.

LP46 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Bibliographie : Pérez Électromagnétisme, BFR4, Tremolet Le Magnétisme, Tout-en-Un PSI/PSI*.

Niveau : L3

Prérequis : EM dans les milieux. Induction. Paramagnétisme, diamagnétisme.

Introduction : On a vu les matériaux dia et para. Malheureusement certains matériaux ne peuvent être classés parmi ces deux catégories. Aimants permanents (Magnésie connue depuis longtemps), matériaux à fortes perméabilités relatives.

Ces matériaux sont Solides, des corps purs, des molécules et des alliages.

I) Matériau Ferromagnétique

1. Contexte

Dire : ARQS, équation de Maxwell. Réécrire la définition de H. Intérêt. Quelques mots sur l'aimantation. Dire que l'on a besoin de l'équation constitutive. Ne parler que de perméabilité relative, pas de susceptibilité relative. Dire que la perméabilité relative **dépend** de H!

2. Courbe de première aimantation

Schéma d'étude. Avec fluxmètre. Relier ϕ et NI à H et B. Insister sur le fait que l'on part d'un matériau initialement non aimanté!

Graphe composante moyenne orthoradiale de B en fonction de composante orthoradiale de H. Bien remarquer que la perméabilité relative dépend de H!

Montrer aussi de l'aimantation moyenne en fonction de l'excitation. Parler de la saturation. Montrer un transparent avec quelques valeurs de saturation (dire que ce n'est pas surprenant par la valeur du Magnéton de Bohr...) Par contre dire que le champ d'excitation requis pour arriver à la saturation diffère grandement d'un matériau à l'autre. OdG.

Valeur de la perméabilité relative. Parler du maximum de perméabilité, de la perméabilité initiale, de l'excitation associée au maximum. Tableau avec la grande variété des ces valeurs. Dire que l'on va pouvoir faire une classification mais avant...

3. Mécanisme mésoscopique de l'aimantation

Citer les faits expérimentaux : saturation, température de Curie, effet Barkhausen.

Petite plaquette montrant les domaines de Weiss (attention l'interaction est là dipôle/dipôle tandis que dans les ferro l'interaction est dite d'échange.) Parler des axes de faciles aimantations qui sont les axes cristallins.

Dimension des domaines de Weiss : 10 micromètre. De la taille des parois (100 de mailles, égalité énergie anisotropie énergie d'échange). Réinterpréter la courbe d'aimantation en trois zones. Glissements réversibles, irréversibles, rotation des derniers domaines. Petit dessin sur transparent. (Sur le premier, où l'aimantation globale est nulle dire que cela minimise l'énergie par le fait que l'aimantation est nulle de par la continuité des composantes normales aux frontières ce qui minimise l'énergie.)

4. Rémanence et champ coercitif

On a augmenté l'excitation, désormais on va la diminuer. La courbe d'aimantation a des zones irréversibles, il est légitime de s'attendre à de l'hystérésis.

Préparer un beau cycle expérimental.

Présenter champ rémanent, excitation coercitive. Donner leurs sens physiques.

5. Classification des ferromagnétiques

Transparent avec hystérésis de l'ánico 5 et le mumétal. Discuter des valeurs de Br ainsi que Hc. Définir doux et durs. Montrer cycle limites des doux et durs.

Pertes dues à l'hystérésis. Aire du cycle, écrire $\int B\delta M$. Conclure quant à la différence d'utilisation. Doux : réversible. Durs : permanence.

II) Applications

1. Reluctance magnétique

Notion qui va être très utile par la suite. Parallèle circuit électrique, circuit magnétique. Petit dessin avec deux résistances électriques en parallèle, la basse résistance laisse passer le courant, la grande l'empêche. Analogie : les ferromagnétiques canalisent les lignes du champ magnétique.

2. Point de fonctionnement d'un aimant permanent

Aimant torique avec entrefer. $(2\pi r - e)H + eB/\mu_0 = 0$. Dire que la reluctance de l'entrefer est dix fois plus grande que la reluctance du reste du tore. C'est du à la grande perméabilité du ferro.

Point de fonctionnement car une fois désexcité, et contraint par une géométrie, le champ se réarrange à l'intérieur du ferro. Dessin avec le cycle d'hystérésis et la courbe de fonctionnement. Le cycle dépend de la nature du ferro. La droite de fonctionnement dépend de la géométrie. On projette. On fait varier la droite si l'on change la géométrie, on fait varier le cycle si l'on change le ferro. Parler des aimants de cuisine (même si la géométrie est différente) et expliquer pourquoi on est obligé d'avoir des ferro extrêmement durs! On a besoin de terres rares!

3*. *Électroaimant*

4*. *Transformateur*

Conclusion : Parler des disques durs. Lecture, écriture. On sait écrire en monodomaine. On ne sait lire qu'à l'échelle du nanomètre que depuis l'avènement de la spintronique et la résistance magnétique géante (GG à Albert Fert.)

LP47 : Mécanisme de la conduction électrique dans les solides

Bibliographie : Kittel. Ashcroft.

Niveau : L3

Pré-requis : EM classique (loi d'Ohm locale, modèle de Drude). Mécanique quantique élémentaire. Base de physique statistique.

Introduction : Leçon qui s'attache à expliquer les propriétés électriques des solides. On ne s'intéressera d'ailleurs qu'aux solides cristallins (glace, sels OSEF). L'objectif est simple, voir quels sont les phénomènes régissant la conduction pour comprendre l'énorme plage de variation de résistivité. Bref, on veut savoir ce que sont un isolant, un conducteur et un semi-conducteur.

I) Cadre de l'étude

1. Formalisme et problématique

Réseau cristallin. Les électrons sont responsables de la conduction. Champ E qui les met en mouvement. Force de frottement fluide. A priori champ B également, mais vu la vitesse des électrons très inférieure à la vitesse de la lumière, on oublie ce terme.

$dp/dt = -eE - p/\tau$ Le courant j vaut $-nev$. C'est la loi d'Ohm locale : $j = \sigma v$

On définit la mobilité qui donne la réponse en vitesse des électrons à E. $v = -\mu_e E$

On a donc $\mu_e = \frac{e\tau}{m_e}$ et $\sigma = ne\mu_e = \frac{ne^2\tau}{m_e}$

La conductivité dépend donc de la densité de porteurs de charge et de la mobilité de ceux-ci. Ce sont les quantités qu'il faudra étudier tout le long de la leçon.

Résistance : μ_e est $m^2V^{-1}s^{-1}$. La densité dépend de la dimension du conducteur. On peut l'avoir 1D, 2D ou 3D.

Ainsi on a $R^{3D} = L/\sigma S$ et $R^{2D} = L/\sigma d$. Autrement dit la conductivité est définie vis-à-vis de la dimension du système.

2. Influence de la température

Plus d'agitation thermique, donc la surface efficace des ions, ou tout du moins des défauts sur lesquels les électrons choquent augmentent, donc l'intervalle moyen entre deux chocs augmente, donc la conductivité diminue.

3. Limites du modèle de Drude

Modèle de Drude élaboré avant la mécanique quantique.

Modèle collisionnel. Rappeler rapidement les hypothèses.

OdG pour le cuivre. On trouve n . On regarde la valeur tabulée de sa conductivité. On remonte à τ qui est lié au libre parcours moyen ($2\mu m$). Bien trop grand vis-à-vis de la maille.

Autres limitations : paramagnétisme, capacité thermique.

II) Gaz d'électrons libre : gaz de Fermi – Ashcroft

1. Statistique de Fermi-Dirac

Drude avait toutes les raisons de supposer à son époque que la distribution de vitesse des électrons suivait les statistiques de Maxwell-Boltzmann. Mais de part sa nature fermionique (exclusion de Pauli), il faut prendre en compte une modification de sa fonction de distribution. C'est la distribution de Fermi-Dirac. Expression avec un T_F et non le potentiel chimique, graphe.

2. Sphère de Fermi

Système, boîte quantique volume V. Schrödinger. Conditions limites.

Connaissant la densité de porteurs, on remonte à la valeur de T_F par la normalisation.

Énergie de Fermi. OdG. Ainsi FD devient un simple "Heaviside" à température ambiante.

On en déduit également la valeur de la v_F qui est la vitesse des porteurs à l'extrême de la sphère de Fermi qui sont susceptibles de changer d'état. C'est la vitesse typique (équivalent à la vitesse thermique pour le gaz classique) pour les métaux.

3. Action d'un champ électrique

Déplacement de la sphère de Fermi. Attention déplacement opposé à E.

4. Influence de la température

Toujours même interprétation : T augmente, plus de chocs sur les impuretés, les défauts et les phonons (il y en a de plus en plus avec la T)

III) Théorie des bandes – Kittel

Modèle des électrons libres permet d'expliquer la conduction dans les métaux. Mais comment maintenant réussir à distinguer isolant, conducteur, semi-conducteur ? OdG de la variation de résistivité. On va améliorer le modèle et placer les électrons dans le potentiel périodique des atomes du cristal.

1. Potentiel cristallin périodique

Objectif : déterminer les bandes d'énergie accessibles aux électrons.

Pour le gaz d'électrons libres, graphe de l'énergie en fonction du vecteur d'onde.

$H = p^2/2m + V$ périodique.

Ici il va y avoir réflexion de Bragg. Et création d'une onde stationnaire.

Bande interdite. Explication du Kittel sur la largeur de la bande. Dessin qui vont bien.

2*. Modèle de Krönig-Penny

Rapidement. Ne pas rentrer dans les calculs. Aboutir au graphe d'énergie avec les bandes interdites.

3. Remplissage des bandes

Deux aspects : nombre d'électrons à placer, chevauchement ou non des niveaux d'énergie.

Graphes qui sont au début du chapitre du Kittel.

Faire des exemples pour classer dans les diverses catégories isolant, conducteur ou semi-conducteur.

IV) Semi-conducteurs – Kittel

1. Bande d'énergie

Dessin. Bande de valence, bande interdite (Egap) et bande de conduction.

Bien dire qu'à température nulle, aucun électron dans la bande de conduction.

C'est la température qui permet de promouvoir des porteurs dans la bande de conduction.

Ou de la lumière ! (photodiode)

2. Conductivité

On veut remonter à la mobilité ainsi qu'à la densité.

SC intrinsèque. Calcul pour la densité à partir de la distribution de Fermi-Dirac. Rappeler que $E_g \gg kT$

Parler de la masse effective, de la mobilité, donner des OdG.

Remarque : $\mu_e = e\tau/m^*$ avec m^* liée à la courbure de l'énergie en fonction de k et τ correspondant aux collisions (impuretés + phonons).

3. Dopage

Principe. Régime extrinsèque donc. Donner la nouvelle densité.

Interpréter la variation de la conductivité avec la température dans les différentes zones intrinsèque, extrinsèque.

Conclusion : Applications innombrables. Retenir que l'apport d'énergie à un semi conducteur promeut des électrons/trous et augmente sa conductivité. Pilotage merveilleux.

LP48 : Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

Bibliographie : Soutif – Vibrations, propagation, diffusion. BUP sur la balançoire. Kittel. Landau Mécanique 1.

Niveau : PC leçon bilan.

Prérequis : Mécanique du point, RSF. Modèle de l'électron élastiquement lié. Optique ondulatoire.

Introduction : Leçon bilan. Familiariser avec le formalisme très général des équations différentielles du second ordre avec un terme de forçage. Ayant attiré au phénomène de résonance : réponse d'un système à une fréquence caractéristique.

I) Résonance temporelle

0. Définition

Insister sur le forçage par excitation fréquentielle.

Transmission d'énergie. Réponse fréquentielle ? Meilleure fréquence pour communiquer de l'énergie.

1. Oscillateur harmonique forcé

Système, résolution pour ω différent de ω_0 . Identifier les termes d'oscillations libres et forcées.

Graphe fréquentiel de l'amplitude et de la phase.

Puissance fournie par la force oscillante par la variation de l'énergie mécanique. Dire que la puissance moyenne est nulle en régime établi.

On passe à $\omega = \omega_0$ par l'écriture judicieuse de l'équation précédente et en faisant apparaître un taux d'accroissement.

Dire qu'il y a divergence ! Donner l'expression de la puissance et montrer qu'elle est non nulle. Bref, ceci est quand même assez peu physique notamment à cause de la divergence. Il faut introduire une force de frottement !

2. Oscillateur harmonique amorti

Nouvelle ED. RSF. Dire que l'excitation est en "position", elle peut être en vitesse ou même en accélération. Dire que c'est un RLC (ou équivalent mécanique).

Trois options : regarder en position (U_c), en vitesse (U_r) ou en accélération (U_l). On choisit en amplitude. Écrire l'expression de la fonction de transfert en position. Parler de Q , de la fréquence propre. Graphes de la fonction de transfert, de la phase. Dire Heisenberg.

Vite fait montrer la résonance en puissance.

3*. Excitation d'un système à 2 degrés de liberté

Levée de dégénérescence due au couplage. Parler de ce qui se passe lorsque l'on coupe le couplage.

4. Récapitulatif

- Généralité du problème : bonne description autour d'une position d'équilibre par l'ED précédente. Mais plus généralement, autour d'une résonance, exemple du diapason.

- Transfert d'énergie : soit c'est une dissipation inutile, et on veut absolument l'éviter, dans ce cas là, il faut s'en éloigner, ou changer volontairement le système pour décaler la résonance ou l'atténuer (amortisseurs de voiture).

On peut aussi se mettre à la fréquence et l'utiliser. Par exemple pour la diffusion, on va diffuser principalement certaines fréquences, parler du bleu du ciel, mais aussi de la résonance du sodium.

- Sélection de Fréquence. Notion de Filtrage (électronique)

II) Résonance paramétrique

1. Principe

Truc du Landau pour introduire naturellement l'oscillateur paramétrique.

Variation périodique de la pulsation propre. Exemples de réalisation, voir le Soutif.

2. La balançoire

Dessin avec le mouvement du centre de gravité. La fonction $\omega(t)$ est un créneau de période moitié par rapport à la période du balancier. Ceci s'écrit : $\omega = 2\omega_0$.

Faire des bilans énergétiques dans le référentiel du labo ($\Delta E_c = W_{poids} + W_{int} > 0$ avec le travail de la force de gravité nulle). Et dans le référentiel de la balançoire ($\Delta E_c = 0 = W_{poids} + W_{int} + W_{inertie} > 0$).

3. Conditions de résonance

Généralisation pour les fréquences de résonances : $n\omega = 2\omega_0$.

Voir le calcul du Landau lorsqu'il y a décalage autour d'une fréquence de résonance.

*Petit raffinement (Soutif), évoquer le taux de modulation (amplitude de la "longueur") et le rapport de la pulsation propre du système à celle de la modulation. On peut définir ensuite des zones dans lesquelles il y a effectivement amplification.

4. Électrons dans les métaux – Kittel

Équation de Schrödinger dans un potentiel périodique (Modèle de Kronig Penney). On tombe directement sur l'équation d'un oscillateur paramétrique.

Résonances paramétriques : $n2\pi/d = 2k$. C'est-à-dire $k = n\pi/d$.

III) Cavité resonante

Quantification due aux conditions limites.

FB : Intensité de sortie sur intensité entrante en fonction de $\Delta\phi$.

Filtrage : contrôle de la fréquence d'un signal.

Principe très général, filtre acoustique. Filtre interférentiel.

Application au laser (milieu amplificateur en plus). Donner des OdG.

LP49 : Oscillateurs. Portraits de phase et non-linéarités

Bibliographie : BUP 744 (mot clé, portrait de phase). Faroux - Renault de Mécanique 1&2.

Niveau : Licence 3

Prérequis : Mécanique. RSF.

I) Espace des phases

1. Problématique

Mettre le système sous la forme d'un ensemble d'équations différentielles du premier ordre.

$mx_{tt} = -V_x$ donne $x_t = y$ et $y_t = -V_x/m$

De manière générale, on a une équation différentielle $x_{1t} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ et de même pour les autres f_i

L'ensemble (x_1, x_2, \dots, x_n) est l'espace des phases. Pour un système à un degré de liberté on a simplement

... A priori les fonctions f_i ne sont pas linéaires!

2. Un exemple : l'oscillateur paramétrique

C'est un système non autonome.

Montrer comment on se ramène à des équations du premier ordre.

3. Portrait de phase

On se restreint à un seul degré de liberté. (x, x_t) correspond à une position cinématique. Variation du temps, le point précédent va décrire la trajectoire dans le plan de phase.

Le portrait de phase caractérise l'équation différentielle, c'est un champ de vecteur. Chaque point définit des conditions initiales. Décrit localement le comportement. Unicité de celui-ci par Cauchy-Lipschitz.

4. Pendule pesant

$\left(\frac{\theta_t}{\omega}\right)^2 = 2 \cos \theta + A$ avec $\omega = \dots$ et A fixé par les conditions initiales.

Tracé du portrait de phase. Bien faire le parallèle avec les vraies trajectoires. Dire que la limite linéaire pour les petites oscillations.

Faire un petit dessin du potentiel en cuvette et montrer que l'oscillateur harmonique est très général, faire correspondre E_c , E_p et portrait de phase.

On vient d'étudier de façon exacte un système non-linéaire que l'on sait n'être pas analytique pour l'équation horaire!

5. Amortissement par frottements fluides

$x_{tt} + \gamma x_t + \omega_0 x = 0$ Graphiques pour les deux signes de γ . Dire que le point $(0,0)$ est équilibre, stable ou instable selon ce signe.

On introduit alors les notions de points attracteurs et par extension de cycles attracteurs.

6. Généralités sur les portraits de phase

Grand intérêt : pas besoin de l'équation horaire! Pas de possibilité de croisement si une seule équation différentielle.

Symétrie par rapport à l'axe des abscisses implique réversibilité.

Aucune information sur la pulsation de l'oscillateur.

Courbes iso-énergétiques pour des systèmes conservatifs. Oscillateur linéaire implique que toutes les trajectoires sont homotétiques $(\lambda x_t(0), \lambda x(0)) \rightarrow (\lambda x_t t, \lambda x(t))$

Exemples sur le pendule pesant.

II) Non-linéarité de raccordement : le mouvement de collé glissé

Oscillateur sur tapis roulant. Travailler en raisonnant sur les relations E_c , E_p ; faire apparaître les équations de cercle, aller très vite.

III) Non-linéarité du système différentiel

Système proie-prédateur. $x_t = \mu x - \alpha xy$ et $y_t = -\lambda y + \beta xy$ avec tous les coefficients positifs.

Recherche des points d'équilibres. Linéarisation autour des ces points.

Note : SciLab, utiliser `help ode` et `help fchamp` pour retrouver les lignes de code.

Montages de Physique

"Pourquoi les électrons, quoi!?! C'est la bizarrerie!"
DamDam

M1 : Dynamique Newtonienne

I) Lois de conservation

Expérience 1 : Mobiles autoporteurs, quantité de mouvement. Utiliser des mobiles de même masse. En pratique, on ne vérifiera pas la conservation vectorielle, ce qui est un peu pénible, mais seulement sur une direction donnée, ce qui est largement suffisant. Pour cela, on peut utiliser une approche très géométrique : on trace une droite à peu près au centre des trajectoires, et on projette les vitesses des mobiles sur cette droite (attention, vérifier qu'on est bien sur les zones de translations rectilignes uniformes). On n'a alors plus qu'à comparer quatre quantités scalaires, qui doivent donner la conservation de l'impulsion sur cette direction, aux incertitudes près. En cas de problème, ou en alternative, on peut aussi vérifier la conservation de l'énergie cinétique, en regardant simplement la norme des vitesses, mais c'est un peu moins élégant.

Expérience 2 : Mobile autoporteur, Loi des aires. Petit socle + ressort. On fixe le socle sur la table (en pratique, il faut le tenir), et on lance un mobile autoporteur attaché à ce socle par un ressort (attention, celui-ci doit être de bonne qualité, et sans point de faiblesse, qui ne donnerait alors plus une force centrale). On peut alors vérifier la loi des aires, en observant que la surface des triangles formés par deux points successifs et le centre de la trajectoire reste constante aux incertitudes près. Pour avoir le centre du cercle, on peut se souvenir que c'est l'intersection de la médiatrice de cordes quelconques. On notera que cette expérience est en pratique très technique, et que l'estimation des incertitudes n'est pas du tout triviale.

II) Étude d'une trajectoire

Expérience 1 : [Pendule **PESANT**] Déterminer le moment d'inertie effectif du pendule grâce aux petites oscillations, avec un chronomètre. On peut le comparer au moment calculé ou tabulé.

On peut ensuite étudier les petites oscillations, prise de point et suivi par synchronie de la trajectoire. Ajustement du cosinus. On reprend des points à plus grandes oscillations. On met les deux trajectoires dans l'espace des phases qu'on met bien en variables adimensionnées (trajectoires qui s'additionnent à deux autres déjà faites en préparation), la pulsation caractéristique ayant été obtenue précédemment. On voit qu'on a bien des trajectoires harmoniques aux petites oscillations, avec déformation aux grandes oscillations (mais cela reste léger).

Tracer l'énergie potentielle, cinétique, totale pour une grande trajectoire. Discuter la conservation de l'énergie, et les pertes par frottement.

III) Dynamique du solide

Expérience 1 : Détermination d'un moment d'inertie. Utilisation de la caméra rapide avec une acquisition automatisé sur le cylindre tournant, qu'on attache à une masse qu'on laisse tomber devant une feuille blanche collée au support. Bien éclairer avec une QI (la mettre sans condenseur), on peut rajouter un morceau de scotch noir si le suivi automatisé a du mal à se faire. Ajuster la position en fonction du temps. Comparer avec le calcul du moment d'inertie à partir de la forme géométrique du cylindre.

M2 : Surfaces et Interfaces

Introduction Discussion sur les notions de surfaces et interfaces. Pas véritablement différentes. Interface fluide fluide qui se déforme et qui est "propre". Tension superficielle. Interface solide solide qui ne se déforme pas mais qui est sale. Rugosité. Frottements solides.

I) Interface solide solide

Expérience 1 : Coefficient de frottement statique.

Planche à l'horizontale, c'est très important. On relie un bloc de masse élevée (mettre une panoplie de petits poids pour le maintenir à l'arrêt) à une masse m par une poulie. On enlève progressivement les petites masses jusqu'à ce que le bloc se mette en mouvement. On en déduit le coefficient de frottement statique. On varie ensuite m , on ajuste par une droite le rapport. Le coefficient directeur représente le coefficient de frottement *statique*. Voir *Quaranta*. Ou faire par l'angle, à savoir on met un bloc sur la planche qu'on incline progressivement avec un boy, l'angle limite est celui pour lequel le bloc se met en mouvement. On notera que tout près de l'angle limite, le moindre choc met la masse en mouvement, ce qui est normal.

Expérience 2 : Coefficient de frottement dynamique.

Voir la notice associée à la planche, le bloc subira pour commencer une phase d'accélération, tiré par un bloc qui tombe. Ce bloc d'entraînement ayant touché le sol, il y aura une phase de ralentissement. Les frottements dynamiques jouent un rôle dans les deux phases. On se place avec une masse m (200g) qui permet le mouvement. La formule est $f_d = \frac{mh}{md+M(h+d)}$. Faire un ajustement en faisant varier h , la hauteur de chute du bloc qui permet l'entraînement.

II) Interface fluide fluide

Expérience 1 : Mesure du coefficient de tension de surface d'un métal liquide par stalagmométrie, alias la gouttométrie. Peser 30 gouttes en les faisant tomber de la seringue. Bien prendre son temps pour faire les gouttes les plus grosses possibles. Rester dans l'acide car sinon on a oxydation très rapide du métal à l'air. Le bilan des forces quasi-statique est fait pour le rayon critique où la goutte tombe : $\Pi + 2\pi r_{int}\gamma = mg$. On a le volume de la bille par son poids et sa densité. Attention, il est très facile de se tromper sur la prise en compte de la poussée d'Archimède. Lorsque la goutte pend dans l'eau, la balance pèse déjà une masse différente²². Cependant, la différence de masse mesurée entre l'acide seul et l'acide et les gouttes au fond (donc sans la seringue) donne directement la masse de métal injectée. (Pérez thermo, Quaranta Méca ou Gouttes perles et ondes).

Expérience 2 : Ondes à la surface de l'eau. *Quaranta. Mécanique.*

Ne pas oublier le grandissement. Mettre une règle entière (et propre) dans le bac **avant** de mettre l'eau, cela permettra d'avoir une valeur précise du grandissement sans souiller l'eau permutée! On ajuste la formule totale modulo l'approximation des faibles profondeurs.

III) Interface solides fluides²³

Expérience 1 : Tensiomètre à lame mouillée.

Dans l'ordre. Boy en bas. On équilibre proprement la lame nettoyée, séchée à l'aide du contrepoids puis à l'aide de la chaînette. En position haute, on cale avec la vis de butée la bascule sur l'indicateur blanc, puis on rajoute de l'eau jusqu'à ce que il y ait juste effleurement (regarder par en dessous). On débloque le système. On ajuste la chaînette pour se remettre à l'arrachement, on repère la nouvelle masse. On en conclut la tension superficielle (on veut se rapprocher de 70 mN/m). On peut ensuite rajouter une goutte de savon pour s'apercevoir de la chute du coefficient. *Expérience 2* : Loi de Jurin. Condenseur + calque diffusant + cuve + diaphragme + 20cm. Faire une image irréprochable en fermant le diaphragme²⁴ pour avoir un contraste optimal. Déterminer le grandissement à partir du rayons des capillaires et d'un pied à coulisse numérique. $h=f(1/r)$. Voir le *Quaranta Mécanique*. Alcool car angle de mouillage quasi nul avec le verre.

22. Si je mets un bac d'eau sur une balance, et que je suspends un objet dans ce bac, je vais mesurer une augmentation de poids sur la balance qui est égal au poids d'un volume d'eau égal au volume de l'objet mis dans l'eau, cela s'obtient très facilement avec la poussée d'Archimède, et le théorème des actions réciproques.

23. Ce titre est un peu dangereux en ce qui concerne le tensiomètre à lame mouillée. On m'a en effet fait remarquer qu'on y suppose le mouillage totale, et que la tension de surface mesurée est celle de l'interface eau/air. On méditera sur ce point.

24. Qui est ici un diaphragme d'ouverture, et permet d'augmenter la profondeur de champ.

M3 : Dynamique des fluides

Introduction

Toujours calculer le nombre de Reynolds. Écrire NS sur le tableau, discuter des diff. termes.

I) Caractères ondulatoires

Expérience 1 : Ondes à la surface de l'eau. *Quaranta. Mécanique.*

Ne pas oublier le grandissement. Mettre une règle entière (et propre) dans le bac **avant** de mettre l'eau, cela permettra d'avoir une valeur précise du grandissement sans souiller l'eau permutée! On ajuste la formule totale modulo l'approximation des faibles profondeurs.

II Effets de la viscosité

Expérience 1 : Écoulement de Poiseuille. S'assurer initialement de l'horizontalité avec un niveau. À débit nul, les prises de pression statique ne doivent pas mesurer de décalage, on doit donc noter à ce moment la position des prises de pression, et ne faire que des différentielles par la suite, car le papier millimétré est souvent décalé. S'assurer de bien avoir atteint le régime permanent lors de la mesure.

Expérience 2 : Stokes. Éclairer par derrière avec un calque qui diffuse une lumière de bureau. Caméra rapide avec acquisition automatisée. Faire plusieurs billes en préparation, en refaire une devant le jury. S'assurer que le régime transitoire avant la vitesse limite est bien hors de la zone de mesure de cette dernière.

III Application à l'aéronautique

Expérience 1 : Capteur Pitot. Comparaison avec l'anémomètre à fil chaud dont il faut connaître le fonctionnement.

*Expérience 2** : Portance. Quantitatif, on met une aile sur une balance devant la soufflerie, il peut être intéressant d'utiliser la sonde de Pitot pour obtenir la vitesse de l'écoulement. Bien s'assurer que l'écoulement est à peu près homogène sur l'ensemble de l'aile, vérifier la proportionnalité à v^2 (vérifier le résultat fonction de l'angle que fait l'aile avec l'écoulement est un peu foireux).

M4 : Capteurs de grandeurs mécaniques ☆

Introduction

Présenter les grandeurs mécaniques. Dénombrer les critères permettant de juger de la qualité d'un capteur. Liste non exhaustive : plage d'efficacité, linéarité, sensibilité, justesse, fidélité, temps de réponse, robustesse, influence des autres paramètres, hystérésis, répétabilité.

On va essayer d'explorer ces critères sur quelques capteurs de grandeurs mécaniques.

Expliquer le concept de capteur : transformation successive de l'information recherchée vers une quantité que l'on peut exprimer avec des chiffres. Transducteur, conditionneur.

I) Mesure de force, de masse

Expérience 1 : Jauge de contrainte et balance électronique.

Expliquer le cheminement de ce capteur : masse -> élongation -> variation résistance -> pont -> tension.

Pour la jauge de contrainte, bien annuler le pont initialement, et attendre l'équilibre avant la prise de mesure. Prendre le voltmètre le plus précis possible pour faire cette mesure. Insister sur "contrainte" et non déplacement, puisque c'est ce qui est mesuré en pratique. Remarque : il y a **deux** extensomètres à fils résistants pour permettre une grande linéarité car aucun DL n'est nécessaire. On peut ouvrir sur le fait qu'à partir du moment où un capteur transforme sur un certain domaine une grandeur physique en tension avec une loi linéaire, on peut en faire un capteur efficace, même si on n'a aucune idée de la loi physique sous-jacente : il suffit juste de vérifier la linéarité!

Il y a possibilité sur la poutre envoyée par Marseille de choisir entre quart de pont, demi pont et pont entier. On peut ainsi voir les améliorations successives en terme de linéarité et de sensibilité. Il faut pour cela être bien à l'aise avec les calculs électriques à l'intérieur du pont.

II) Mesure de position

Expérience 1 : Effets capacitifs. Dans la *Notice* est précisé le comportement fréquentiel du capteur. Un schéma électrique y est accolé. Penser à bien utiliser le LCRmètre avec la fréquence où le comportement est bien capacitif. (Si besoin de temporiser, on peut éventuellement faire cette étude fréquentielle, c'est peu ou prou un diagramme de Bode.) Mettre le capteur ou l'éprouvette sur un Boy et le descendre ou le monter délicatement dans l'eau (du robinet), et mesurer les variations de capacité, qu'on vérifiera bien comme étant linéaire avec la hauteur d'immersion du capteur. Si on a un peu de temps et qu'on s'ennuie, on peut aussi vérifier avec les deux bâtons indépendants qu'on déplace dans l'eau à hauteur fixée que l'eau est bien conductrice, et qu'un déplacement latéral dans l'eau ne change pas la capacité du tout.

III) Mesure de vitesse

Expérience 1 : Pitot fluide. Comparaison avec l'anémomètre à fil chaud dont il faut connaître le fonctionnement. Préciser que c'est un capteur non-linéaire. Insister sur le fait que cela n'est pas gênant car la condition nécessaire d'un capteur est la bijectivité (et non la linéarité); en profiter pour calculer la sensibilité (qui dépend de la plage d'utilisation).

Expérience 2 : Effet Doppler sur table traçante. Émetteur + récepteur accolés, commencer par se mettre à la résonance du piézo, vers 40kHz. Détection synchrone voir le *Duffait*, RC (10kohm et 0,3microF) suffisant pour cette manip. Attention ne pas oublier qu'il y a un facteur 2 du au trajet aller ET retour. Discuter de la gamme de fonctionnement de la détection synchrone, de sa sensibilité vis-à-vis de la détection synchrone, de l'oscilloscope, de la porteuse... Application au doppler médical.

Autres expériences

Expérience 1 : Estimation de la justesse et de la fidélité d'un capteur d'accélération MEMS (Micro electro mechanical system). Concept : peigne capacitif.

On fixe ce capteur sur un masse reliée à un ressort. Le ressort est lui même associé à une jauge de contrainte qui renseigne sur les forces mises en jeu. De plus on fabrique facilement un capteur de position potentiométrique : un tube en plexiglas rempli de solution conductrice, une plaque au fond à -15V et un anneau en haut à +15V. On regarde alors le tension qui est linéaire avec la hauteur.

Après calibration tension -> hauteur, on dérive deux fois pour obtenir l'accélération. On l'obtient aussi par le PFD grâce à la tension. On a ainsi trois manière de trouver l'accélération.

Expérience 2 : Mesure d'une vitesse angulaire par effet inductif.

Une roue ferro présentant des inhomogénéités régulières (3 creux ou 3 rayons par exemple) tourne devant un noyau ferro passant dans une bobine dont la tension est visualisée sur l'oscillo. Le ferro est aimanté de l'autre côté par un aimant fort.

On retrouve la vitesse angulaire par analyse fréquentielle du signal.

M5 : Mesures de températures ☆☆☆

Introduction Blabla sur l'échelle internationale de température. Utilisation des points triples pour étalonner. Notion de thermomètre primaire, secondaire, et tertiaire.

I) Étalonnage d'un thermomètre secondaire à partir de points de référence thermodynamique

Expérience 1 : Point triple de l'azote, azote bouillante (attention la température d'ébullition varie avec la pression, il faudrait connaître la pression en demandant un manomètre le jour de la préparation pour associer la véritable température, ou en tout cas pouvoir estimer la différence à la valeur tabulée par Clapeyron, et montrer qu'elle est négligeable), eau bouillante (de même), glace. Utiliser la sonde platine (très pur, pas de variété allotropique, faible réactivité chimique) avec une mesure 4 points. Vérifier avec un ampèremètre en série que l'on n'envoie pas trop de courant dans la résistance. Sur le point triple de l'azote, montrer que pomper ne change pas les paramètres thermodynamiques²⁵. D'après Matthiessen, on sait que la résistance de la sonde de Platine est linéaire avec la température. Ajustement sur les 4 points. On a donc la Pt étalonnée et sa sensibilité $1/R \, dR/dT$.

II) Thermomètre primaire : Loi de Planck

**Expérience 1* : Présentation d'un thermocouple.

Expérience 2 : Pyromètre optique : vérification de la loi de Planck.

Chauffer en mettant le transformateur de puissance à 100%, jusqu'à atteindre de l'ordre de 400°C Celsius, couper le chauffage, et prendre des points après cinq minutes de délai (température au thermocouple dans le four, puissance à la photopile devant le four) pendant de l'ordre de une heure. Pendant la présentation on aura lancé le chauffage, qu'on arrête quand le four est entre 200 et 300°C; après 5 minutes, on prend quelques points, qu'on rajoute sur la courbe. Si la photopile a bougé, ce qui est assez fréquent, on peut prendre des points au vol pendant une dizaine de minutes, en continuant son montage, et refaire l'ajustement avec seulement les points pris en préparation. Ne pas oublier de mettre en Kelvin, il est plus prudent de régler directement le thermomètre en K pour éviter les oublis.

III) Étude d'un thermomètre tertiaire

Expérience 1 : Thermistance. On met la thermistance et la résistance de platine qu'on a étalonnée en début de montage dans un petit²⁶ bûcher d'eau chaude qu'on met sous agitation dans un cristalliseur de glace. Le temps de réponse des thermomètres (cf la suite) étant très petit devant le temps caractéristique de refroidissement du bûcher, on va pouvoir suivre les résistances au cours du temps. On utilise pour cela l'enregistreur d'Igor, avec un ordinateur relié à deux multimètre. On aura alors étalonné le thermomètre tertiaire à partir de notre thermomètre secondaire étalonné précédemment avec des points triples thermodynamique. Bien tout mettre en Kelvin. On peut alors montrer l'intérêt des termes successifs dans la dépendance thermique de la résistance de la thermistance, une très jolie discussion est possible (car le résultat est très précis!). On en tire aussi le Gap du semi-conducteur. Comparaison des deux sensibilités, celle de la thermistance est plus grande, et c'est ce qu'on voulait!

Expérience 2 : Réponse temporelle. On met d'un coup une thermistance similaire à la précédente dans de l'eau chaude en suivant sa tension. On l'aura mise dans un circuit avec un générateur de tension et une résistance importante devant celle de la sonde, ce qui permet de faire en fait un générateur de courant, mais d'être sûr que ce n'est pas la réponse du générateur qu'on suit (habile!). En faisant l'acquisition par Synchronie, on peut voir une jolie exponentielle de quelques centaines de millisecondes de long. Mesure du temps caractéristique, le relier à $L = \sqrt{D\tau}$

Conclusion Jongler entre sensibilité, domaine d'utilisation, facilité à étalonner. Tertiaires plus sensibles...

25. En pratique, on repère une erreur systématique sur le nanomètre, de l'ordre de quelques Pa.

26. Simplement pour que le temps de refroidissement ne soit pas trop long...

M6 : Transitions de phase ☆✱

I) Étude du graphe des phases

Expérience 1 : Point triple azote. Vérifier que pomper ne change pas les paramètres thermodynamiques. En pratique, on peut même observer que le manomètre a une erreur systématique de quelques Pa.

Expérience 2 : SF₆. L'idée est tracer une partie du graphe des phases dans un diagramme P/T. Pour cela, l'idéal est de tracer une belle iso-T près du point critique, donc 40°C (le point critique est à 45°C), puis de s'intéresser principalement au tracé de la courbe de rosée et d'ébullition (sinon, ça prend trop de temps, et les isothermes tracées rapidement sont vraiment moches). On remarquera le caractère iso-P du domaine de coexistence. En pratique, à partir de l'apparition du liquide, le temps de relaxation est de l'ordre de la minute, il est donc important d'être patient, et avoir de beaux résultats sur cette manipulation n'est pas du tout évident. Typiquement, si on est pressé, on verra que la coexistence n'est absolument pas iso-P. Il est inutile de trop s'éloigner du point critique, car les résultats seront plus difficiles à avoir, et moins beaux.

II) Transition du premier ordre, propriétés

Expérience 1 : Chaleur latente de l'azote. On chauffe avec une résistance électrique un Dewar d'azote mis sur une balance. Bien noter que la puissance cédée à l'azote est la somme de la puissance électrique et de la puissance des pertes thermiques. Les pertes sont simplement estimées en observant l'évolution de la masse d'azote liquide sans chauffage. On fera donc le suivi temporel de cette masse, avec une phase sans chauffage, une phase avec chauffage, puis une phase à nouveau sans chauffage. La comparaison entre la première et la dernière phase permet de quantifier que les pertes thermiques n'ont pas considérablement changées. Il ne faut surtout pas tarer la balance au cours de la mesure, car le temps caractéristique de remise à 0 de l'affichage est plus grand que le temps caractéristique de variation de la mesure, et la balance affiche alors 0 en continu. Attention en cherchant la valeur tabulée de la chaleur latente de vaporisation de l'azote, car on étudie ici du di-azote ! Une expérience alternative qui peut être réalisée est le suivi de la température de vaporisation de l'azote en fonction de la pression, avec la pompe à vide. La chaleur latente se déduit de la relation de Clapeyron, mais ce n'est pas forcément très adapté, ni très démonstratif.

Expérience 2 : Refroidissement de l'étain, et palier de température, ainsi que retard à la solidification. Suivi sous synchronie par un thermomètre placé dans le creuset, qu'on a préalablement chauffé au bec Meker. Ne pas attendre trop longtemps dès lors qu'il est fondu, car l'étain évacue beaucoup plus lentement l'énergie thermique qu'il la reçoit avec le feu aux fesses. Lancer 15 min d'acquisition.

III) Second ordre

Expérience 1 : Opalescence critique + strioscopie. Condensateur 8cm sur trou + 10cm auto-collimatée + cuve + 10cm diaphragmée²⁷ + filtre + écran.

Attention il faut un sèche cheveux puissant sinon ça prend des plombes. Prendre aussi une réserve de glaçon que l'on placera dans un petit béccher bien utile pour refroidir plus vite la cellule. Rappel : coalescence à la montée, opalescence à la descente. Il est assez difficile de visualiser le changement de couleur, et il faut si possible faire le noir complet dans la pièce. Regarder directement la cuve peut être plus probant.

Faire graphe PV et PT au tableau pour montrer le parcours. Préciser que la densité est calculée pour que ça fonctionne.

Expérience 2 : Transition ferro/para. Thermomètre avec un bout en fer qu'on chauffe, sur lequel est accolé un bouclier thermique et un aimant, attaché par aimantation tant que le fer est ferromagnétique. Mesurer la température à la montée à la descente, ça double le nombre de mesures, et c'est gratuit (alors pourquoi s'en priver ?). Noter que la température que l'on doit obtenir doit techniquement être inférieure à la température de Curie, car l'aimant tombe quand la force entre lui et le thermomètre n'est plus suffisante pour compenser son poids.

²⁷. Pour avoir une image plus nette et augmenter la profondeur de champ. Il sert à la fois de diaphragme d'ouverture, et de diaphragme de Gauss, pour ne garder que les rayons dans l'approximation du même nom.

M7 : Instruments d'optique ☆☆☆

Introduction

Trois types d'éléments pour fabriquer des instruments d'optiques. Miroir, lentille, pupille.

Il peut être intéressant lors de ce montage d'utiliser en parallèle du formalisme bien connu des *rayons lumineux*, le formalisme tout aussi pertinent qu'est celui du *front d'onde*. Des rayons venus de l'infini sont équivalents à un front d'onde plan. Une source ponctuelle crée un front d'onde sphérique. Une lentille idéale est un convertisseur de front d'onde plan en front d'onde sphérique centrée sur le foyer associé à la direction de l'onde incidente, et réciproquement.

I) Ingrédients d'un système optique

L'on s'attendrait à une seule focale.

Expérience 1 : [Aberration géométrique] Hg + condenseur 7cm + filtre interférentiel raie verte + F + Grosse lentille + écran. Montrer que l'image de la tâche image est plus étendue que prévue. Essayer les deux sens possibles pour la lentille, et avec un diaphragme ne garder que les rayons gaussiens → Aboutir sur les conditions de Gauss et à la règle des 4P.

Expérience 2 : [Aberration chromatique] Image d'un petit trou formée par une lentille chromatique (20cm) Deux filtres interférentiels violet et vert. Calcul de la distance focale pour les deux longueurs d'onde. Calcul du pouvoir dispersif des lentilles.

Expérience 3 : Pupille et diffraction. Même montage que précédemment, mais l'objet est cette fois-ci une diapositive à 3 doubles fentes. Prendre une lentille corrigée, y accoler une fente réglable. Se placer à la limite de diffraction (c'est très explicite avec les trois doubles fentes), vérifier le critère de Rayleigh (fente calibrée).

Conclure en disant que dans tous nos montages d'optique, il faudra essayer de minimiser les aberrations géométriques et chromatiques, et que chaque système optique fera de la diffraction (au moins via son cadre).

II) Téléobjectif d'appareil photo

Expérience 1 : Notion de nombre d'ouverture. Influence du nombre d'ouverture sur la profondeur de champ. Plaque grillagée diffusante, placée de coin. Amélioration de la netteté quand f/D augmente.

Expérience 2 : Faire une remarque sur la luminosité. Ajuster la droite $\phi(f/d) = \alpha \times (f/D)^2$, pour cela, bien éclairer de façon uniforme l'objectif, et suivre la luminosité avec une photodiode auto-alimentée.

III) Modélisation d'un instrument optique : lunette astronomique

Expérience 1 : Présentation. Intérêt. On crée un objet à l'infini avec une lentille en l'autocollimatant. Attention, quand un objet est à l'infini, les rayons ne sont pas parallèles à l'axe optiques, mais s'éloignent progressivement, car on travaille dans l'espace des vecteurs d'onde, et donc des angles. Il faudra si nécessaire approcher l'objet "à l'infini" de la lunette, ainsi que l'œil fictif de celle-ci, pour avoir l'intégralité de l'objet, mais cela est simplement dû aux conditions de laboratoires, qui ne sont pas celles qu'on a en étudiant des étoiles.

Expérience 2 : Utilisation de la lunette (simplement deux lentilles en configuration afocale, dont le plan image de la première est confondu avec le plan objet de la deuxième). Avec un peu de skill, on peut la construire au fur et à mesure sur le banc optique, cela n'est pas bien compliqué. Cercle oculaire, œil fictif, qu'on construit simplement avec une lentille et un écran dans son plan focal image. On peut alors vérifier le grandissement.

Expérience 3 : Discussion diaphragme de champ (ne change pas la luminosité)/ diaphragme d'ouverture (celui du téléobjectif), il faut les mettre au bon endroit sur la lunette. En pratique, si on oublie, il faut se rappeler que l'ouverture est là où la lumière est condensée, mais l'image non formée, et le champ là où l'image est formée. Si il reste un peu de temps, on peut montrer que cela ne change pas si on prend la position conjuguée de ces diaphragme par une quelconque des lentilles, mais c'est en fait un peu technique.

Conclusion

Ouvrir sur le télescope et les miroirs.

M8 : Interférences lumineuses ☆☆☆

I) Interférences par division du front d'onde : fentes d'Young (doubles fentes calibrées plus scotch)

Expérience 1 : Figure d'interférence. Lampe à mercure, filtre vert. Éclairer violemment en lumière parallèle gaussianisée par un diaphragme. Sur écran, puis avec densité 0.5 et CCD linéaire. Il faut noter que la CCD ne peut pas faire un noir tout seul, il faudra le prendre manuellement, et l'enlever au signal total sur Igor. $I(x) = I_0 \text{sinc}^2(\frac{\pi bx}{\lambda D}) [1 + \gamma(e) \cos(\frac{2\pi ax}{\lambda D})]$. Il faut être capable de bien reconnaître rapidement à quel paramètre géométrique est dû chaque terme. En pratique on identifie le $1 + \cos$ caractéristique des interférences à deux ondes, modulé par un contraste dû à la cohérence spatiale, et un sinc dû à la largeur finie des fentes, modélisée par une porte.

Attention, prendre l'image avant de jouer avec les paramètres car on perdra en qualité.

Paramètres d'ajustement (centre, amplitude, pulsation 1 et 2, contraste et niveau de bruit) Transcender le jury. Pour ce genre d'ajustement très compliqué, il est préférable de rentrer toutes les constantes dans Igor, pour qu'on ai par exemple simplement les tailles caractéristiques comme paramètres d'ajustement. Cela permettra de s'y retrouver en cas de problème, car on connaîtra les valeurs attendues. Si ce n'est pas fait, il est très facile de se perdre complètement dans un ajustement à 6 paramètres.

Expérience 2 : Montrer la non localisation. Enlever le filtre, et montrer que ce sont bien les intensités qui s'additionnent pour des pulsations différentes.

Expérience 3 : Cohérence spatiale : agrandissement fente source. Faire le lien entre le contraste et largeur de la fente. Montrer la première annulation, etc ... Qualitatif ($\gamma(e)$ est un sinus cardinal).

II) Interférence par division d'amplitude : Interféromètre de Michelson

Pour le réglage voir le tout en un PSI, PSI* Dunod.

Expérience 1 : Présentation de la lame d'air avec une lampe à vapeur de sodium. (Mettre une lentille de 100cm à la sortie du Michelson, cela fait des images beaucoup plus nettes. Faire l'image de la lampe sur les miroirs, pour avoir le maximum d'intensité. De toute façon, comme on observe une égale inclinaison, il n'est pas important que l'ensemble des miroirs soient éclairés, mais on veut par contre de la luminosité sur un maximum de directions différentes). Vérification de $r = \sqrt{p - p_0}$ en lame d'air. Griser l'incertitude directement sur la feuille collée au tableau. Quand les franges ne sont pas visibles sur l'écran et qu'on n'arrive pas à les avoir, chercher à l'œil est souvent une bonne solution.

III) Application à la spectroscopie

Expérience 1 : Doublet du Na. lame d'air. Commencer par montrer qualitativement les annulations du contraste, puis effectuer la mesure à la main. Attention au facteur entrant en compte dans la différence de marche par rapport au décalage du miroir affiché sur le vernier.

Aller trop loin et montrer que l'on perd la cohérence temporelle. On peut en estimer la longueur de cohérence de la source, ce qui revient à un facteur c à son temps de cohérence.

IV) Caractère vectoriel de la lumière

Expérience 1 : Polarisation croisée + Fresnel Arago. Utiliser le laser auto collimaté car perte de luminosité avec les polariseurs. Bien mettre un polariseur en entrée même si le laser est déjà polarisé. Voir le protocole dans le *Sextant*. Ouverture possible sur la complémentarité.

Conclusion : On a fait dans ce montage de la division d'amplitude et de front d'onde, de la cohérence temporelle et spatiale, une application à la spectroscopie, et des interférences en lumière polarisée. Que demander de plus ?

M9 : Diffraction des ondes lumineuses ☆☆☆

I) Diffraction de Fraunhofer

Expérience 1 : Fente calibrée²⁸. Sinc sur CCD linéaire. Le noir ne peut pas se prendre automatiquement, il faut donc le faire manuellement, et le soustraire sous Igor. Le faire avec un laser élargi : cela permet le déplacement de la fente, et aussi qu'il n'y ait pas une saturation monstrueuse sur le pic central, et donc un ajustement beaucoup plus propre. Faire d'abord l'ajustement, et revenir à la largeur de la fente, puis bouger la fente et montrer que rien ne change. Dire que l'on est dans les conditions de Fraunhofer.

Expérience 2 : Théorème de Babinet sur aiguille, avec évidemment ici un laser ponctuel, QUALITATIF.

II) Influence de la diffraction sur le pouvoir de résolution

Expérience 1 : [réseau sur Hg (filtre jaune)] Critère de Rayleigh à la CCD, il est possible de faire apparaître visuellement à l'ordinateur un très beau critère de Rayleigh, avec une superposition très bien déterminée des deux raies. On note que cette manipulation demande un alignement très précis, sinon la raie double sera floue. Si on arrive pas à bien la déterminer, il est possible de tourner légèrement le réseau pour le mettre face à la direction de la raie double, mais il faudra savoir le justifier vis à vis du jury, au cas où il le demande²⁹. Détermination grossière de la largeur limite à la règle par diffraction avec un laser et un écran éloigné (cela permet d'appuyer sur le fait que la diffraction est une très bonne méthode pour faire des mesure géométriques de dimensions caractéristiques proches du micromètre). Vérifier que ça marche (c'est bien la diffraction qui limite le pouvoir de résolution).

III) Diffraction par des motifs multiples

Expérience 1 : Tâche d'Airy pendant l'explication avec trou et laser ponctuel.

Expérience 2 : Lycopodes, les éclairer simplement avec un laser. Comparaison microscope (saupoudrer les lycopodes sur la lame avec la petite règle si besoin).

IV) Filtrage optique des fréquences spatiales

Expérience 1 : TF de grille. Abbe. QI puissante avec condenseur 8cm focalisé sur le petit trou de la plaque étalonnée (ou petit diaphragme)³⁰ + 15cm autocollimatée + diaphragme pour Gauss + Grille d'Abbe³¹ + 10cm pour faire image sur écran. En lumière blanche. Faire image de la croix de Mills en la projetant sur l'écran avec une autre lentille. Il est alors possible de visualiser la fente calibrée qu'on met dans le plan focal de la deuxième lentille, car on a projeté ce plan sur l'écran. En ne prenant que la branche horizontale ou verticale sur la croix, on supprime la moitié de la grille. On peut aussi prendre seulement la teinte plate en filtrant avec un diaphragme.

NB : Si les consignes indiquées ici sont suivies à la lettre, on se rendra compte qu'on peut faire tout le montage de Abbe en lumière blanche de façon assez visible en seulement 2 à 3 minutes grand max. Seulement, il faudra prendre un soin particulier au choix du matériel (avec notamment la bonne grille, et des diaphragmes effectivement petits), et aux précisions classiques des manipulations d'optique (on autocollimate avec des miroirs et pas à l'instinct, on respecte systématiquement les 4P, on centre et on aligne bien tous les systèmes optiques, et on éclaire les fentes sur leur côté plat).

NB 2 : Il existe une expérience fondamentale qui rentre parfaitement dans cette rubrique, c'est celle du couteau de Foucault. Ce test permet d'estimer l'efficacité d'un système focalisant. J'encourage vivement les étudiants à se renseigner quant au dispositif optique qui n'est pas si compliqué que cela au moins pour en avoir connaissance et pourquoi pas, pour essayer de monter une manip. qui serait forcément inédite et appréciée.

28. Nous avons prévu initialement de le faire avec une lampe puissante à vapeur de Mercure. Mais cela demande beaucoup plus de précision de manipulation, et des fentes un peu plus grandes mais non calibrées : aucune comparaison simple n'est alors possible, ce qui complique beaucoup la manipulation. Finalement, l'utilisation du laser élargi nous semble donc plus adaptée, et surtout moins risquée.

29. En pratique, ce n'est pas gênant que le réseau ne soit pas éclairé sous incidence exactement normale, et il faut bien se rendre compte que les sources secondaires n'émettent bien évidemment pas de vraies ondes sphériques.

30. Il est très important que le trou soit le plus petit possible, et cela ne marche pas avec un simple diaphragme, car la croix de Mills sera convoluée avec l'image de ce trou. Ainsi dès que le trou est plus grand que les dimensions caractéristiques de cette croix, aucun filtrage propre ne sera possible.

31. Elle doit avoir un pas bien précis pour que la croix de Mills et le grillage réel soit de taille utilisable, cf la valeur donnée dans le Sextant.

M10 : Spectrométrie optique ☆*

Introduction Résolution. Méthode dispersive, d'autant plus efficace que les longueurs d'onde sont éloignées, méthode interférométrique, d'autant plus efficace que les longueurs d'onde sont proches. Pour chaque interféromètre, il est intéressant de discuter la sensibilité et le facteur limitant (les deux discussions étant reliées).

I) Méthode dispersive

Expérience 1 : PVD beau spectre en lumière blanche et spectrale.

Expérience 2 : Lampe spectrale Hg + réseau + mesure des angles par réseau et goniomètre. Bien régler le goniomètre : Repérer l'angle d'alignement sans mettre le réseau. Mettre le réseau, le tourner pour avoir une réflexion correctement axée. Ne pas faire l'angle de minimum de déviation mais plutôt ordre 1 - ordre -1 divisé par 2. A priori il y a peut-être une erreur sur la calibration du pas du réseau. Il peut être pertinent de tracer la droite $\lambda_{tab} = f(\lambda_{mesure})$, c'est une droite de pente 1/a. On notera en effet qu'un décalage par rapport à la valeur tabulée des caractéristiques du réseau n'est pas forcément aberrant, car on fait des mesures extrêmement précises. De plus, si le réseau a été fait à chaud, une contraction thermique est facilement de l'ordre de grandeur du décalage constaté.

II) Méthode interférentielle

Expérience 1 : Doublet du Na en lame d'air (Mettre une lentille de 100cm à la sortie du Michelson, cela fait des images beaucoup plus nettes. Faire l'image de la lampe sur les miroirs, pour avoir le maximum d'intensité. De toute façon, comme on observe une égale inclinaison, il n'est pas important que l'ensemble des miroirs soient éclairés, mais on veut par contre de la luminosité sur un maximum de directions différentes). Commencer par montrer qualitativement les annulations du contraste, puis effectuer la mesure à la main. Attention au facteur deux entrant en compte dans la différence de marche par rapport au décalage du miroir affiché sur le vernier.

Expérience 2 : Largeur Na à la main³². Chercher la perte de contraste. On peut en estimer la longueur de cohérence de la source, ce qui revient à un facteur c à son temps de cohérence, et donc à la largeur de raie. Ne pas oublier le facteur deux.

III) Étude d'un spectre

Expérience 1 : Rydberg. Observer simplement le spectre de l'hydrogène par le spectromètre USB bleu. En choisissant habilement les raies qu'on considère, on remonte à la valeur de la constante de Rydberg.

Expérience 2 : Rhodamine. Émission, absorption. Pour l'absorption, on fera déjà un blanc avec une cuve identique et le solvant. On éclaire violemment en faisceau parallèle sur la cuve, et on observe au spectro USB derrière. Pour l'émission, il faut éclairer de même violemment avec une lampe à vapeur de mercure filtrée sur une longueur d'onde autre que celle où on a émission, et coller le spectro latéralement sur la cuve, pour avoir le max de luminosité, et ne pas voir la lumière en entrée. On vérifie que l'émission est à une longueur d'onde différente de la lumière envoyée. Expérience uniquement qualitative, à moins d'arriver à trouver les maxima d'absorption et d'émission dans la littérature.

³². En ce qui nous concerne, nous pensons que l'utilisation du moteur pas à pas rajoute beaucoup de difficultés pour pas grand chose. Et notamment le fait de manipuler une dizaine de minutes dans le noir. En pratique, cela se fait très bien à la main, et est très sympathique à présenter.

M11 : Émission et absorption de la lumière ✱

I) Émission thermique

Expérience 1 : Émission thermique, ampoule sur support³³ à différentes puissances (gros transfo 220V 220V + wattmètre et ampèremètre), visualisation du spectre au spectromètre USB (Noir complet + long temps d'exposition à basse température 5s); pour avoir un rapport des intensités lumineuses, il suffit de ramener toutes les mesures à un même temps d'exposition, on verra bien le spectre de Planck grossir et se décaler vers le bleu. Retrouver la résistance grâce à la formule P/I^2 , en déduire T par la loi de Matthiessen (cf. Handbook). Tracer la longueur d'onde maximale d'émission en fonction de T. Mais ne pas chercher à vérifier la loi de déplacement. Ne pas oublier qu'on n'a aucune chance de retomber sur le corps noir, puisque c'est un corps gris avec une émissivité qui dépend de la longueur d'onde.

NB : Cette expérience n'est pas totalement aboutie, et nous sommes un peu partagé en ce qui concerne ce qui est à présenter effectivement. C'est à chacun de voir ce qu'il veut en faire. Quoi qu'il en soit, c'est un très beau résultat qualitatif. Le traitement par Matthiessen est ensuite un peu long, et il faut savoir que ça ne donne qu'un résultat semi-quantitatif. En tous cas, cette expérience a le mérite d'être originale.

Une alternative peut être de mesurer le flux total en fonction de la température. La température est mesurée grâce au spectre de Planck obtenu avec le spectro USB. L'émission doit être en T^4 , et proportionnelle à la surface du filament, dans l'approximation que toute l'énergie est dissipée par le filament. Mesurant cette énergie dissipée par l'énergie fournie au filament grâce à un Wattmètre, on peut se ramener à une loi en $P \propto T^4$. Cette manipulation semble plus réaliste, mais doit cependant être testée avant d'être présenté à l'oral.

II) Émission spontanée

Expérience 1 : Lampe spectrale Hg + réseau + mesure des angles par réseau et goniomètre. Bien régler le goniomètre : Repérer l'angle d'alignement sans mettre le réseau. Mettre le réseau, le tourner pour avoir une réflexion correctement axée. Ne pas faire l'angle de minimum de déviation mais plutôt ordre 1 - ordre -1 divisé par 2. A priori il y a peut-être une erreur sur la calibration du pas du réseau. Il peut être pertinent de tracer la droite $\lambda_{tab} = f(\lambda_{mesure})$, c'est une droite de pente 1/a. On notera en effet qu'un décalage par rapport à la valeur tabulée des caractéristiques du réseau n'est pas forcément aberrant, car on fait des mesures extrêmement précises. De plus, si le réseau a été fait à chaud, une contraction thermique est facilement de l'ordre de grandeur du décalage constaté.

Expérience 2 : Lampe spectrale Hg haute pression (raie verte, choisir le bon filtre, 'lol'). Mesure largeur de raie au Michelson et charriotage à la main. Cf le montage précédent.

III) Absorption

Expérience 1 : gap semi-conducteur GaP. On peut soit le faire au monochromateur avec observation directe, soit le faire à l'USB, en regardant le graphique en transmission. On en déduit le gap du semi-conducteur. On peut noter qu'on n'aura évidemment pas une simple marche type Heaviside, car il faut prendre en compte la forme exacte des bandes de conduction et de valence.

IV) Ré émission : fluorescence

Expérience 1 : Schweppes + UV. Hg avec filtre interférentiel ne laissant passer que l'UV, faire un joli faisceau qu'on envoie sur une cuve de Schweppes, et éteindre la lumière. Parler de Beer-Lambert tant qu'on y est, c'est très visible à l'œil.

Expérience 2 : Spectre d'émission du Schweppes pour montrer que c'est dans le bleu, avec le spectro USB. Connaître la différence entre fluorescence et phosphorescence, ce sont des transitions différentes qui ont aussi des temps caractéristiques différents. Préciser en passant que c'est grâce à la fluorescence que les lessives "blanchissantes" fonctionnent !

Conclusion : Ouvrir sur l'émission induite.

Remarque : Il est aussi possible de faire un peu plus d'absorption en rajoutant la manipulation de la rhodamine, cf le montage précédent sur la Spectrométrie optique.

33. Attention, la Quartz-Iode a une température de couleur fixée!

M12 : Photorécepteurs ☆

Introduction L'œil est un photorécepteur très performant, mais on cherche à rendre objectif les choses, on passe donc aux photorécepteurs.

Rendement quantique (sensibilité), réponse spectrale, Linéarité, temps de réponse.

I) Du rayonnement EM au courant d'électrons

Expérience 1 : [Photodiode] Sextant GBF. Caractéristique I U, oscillo XY, mettre un transformateur d'isolement entre le GBF et l'ensemble photodiode-résistance pour avoir véritablement I et U (on peut mettre la masse entre les deux composantes), attention au sens de la photodiode. Variation de R, du flux incident. Observation des domaines de linéarité et de non linéarité. Mettre la voie relevant l'intensité sur une petite résistance fixée tandis que l'on variera une boîte à décade sur des résistances bien plus conséquentes, cela permet de faire une observation beaucoup plus propre.

Expérience 2 : [Photodiode] Linéarité de la réponse. On passe au voltmètre. Ne pas oublier le courant d'obscurité. Utiliser la loi de Malus.

II) Sensibilité et rendement quantique

Expérience 1 : [Photodiode] Laser + mesure de puissance par le mesureur de puissance laser, le faire avec deux longueurs d'onde différentes pour montrer que la sensibilité dépend de λ .

Expérience 2 : [PM] Densité 3 + densité 2. Bien éteindre les lumières. Même mesure. Montrer éventuellement sous IGOR la loi $s = kV_{alim}^n$ où n est le nombre de dynodes.

III) Application : [Cellule voltaïque]

Expérience 0 : QUALITATIF : faire tourner un moteur continu avec le panneau solaire.

Expérience 1 : Mesure Uvide, Icourtccircuit. Faire varier la charge et regarder aux ampèremètre et voltmètre la charge optimale qui est proche de U_v/I_{cc} (ne surtout pas le faire avec un wattmètre, ils ne sont pas assez précis).

Expérience 2 : Rendement énergétique par mesure au pyromètre. Bien prendre en compte les différence de surface. On doit trouver entre 5 et 10%, connaître les rendements actuels des meilleurs panneaux solaires, de l'ordre de 20%.

M13 : Biréfringence et Pouvoir Rotatoire ☆☆☆

Remarque : Une lame est dite mince si son épaisseur optique ($e\Delta n$) n'excède pas quelques longueurs d'onde. Typiquement dans l'expérience du compensateur de Babinet, on ne décale la frange centrale que de quelques interfranges.

I) Milieu biréfringent

Expérience 1 : Mise en évidence sur le gros cristal de spath (potasser la théorie dans le *Sextant*). QI, faire l'image d'un trou. Polariseur en aval, en amont. La biréfringence sépare les polarisations mais ne les modifie pas! Attention, bien noter que pour avoir séparation des rayons géométriques, l'axe optique du spath est incliné dans un plan de coupe.

Expérience 2 : Lame épaisse, montrer les axes neutres. Spectre cannelé qualitatif. (QI) permet de montrer que le caractère biréfringent ne dépend pas de la longueur d'onde (mais la rotation de la direction de polarisation dépend de la longueur d'onde). On pourrait utiliser cela pour mesurer l'épaisseur optique d'une lame épaisse mais on ne va pas le faire ici. Par contre pour une lame mince il n'y aurait que deux annulations dans le spectre visible. Une telle méthode n'est pas envisageable, on va donc...

Expérience 3 : [Compensateur de Babinet] voir le *Sextant*. Lame mince, axes neutres, couleurs complémentaires (à 45 degrés). Présentation, axes neutres, lignes neutres. Le mettre à 45 degrés. Application à la mesure de Δn pour une lame mince. On n'a pas besoin du grandissement puisque c'est le rapport d/i qui donne le résultat. d en lumière blanche, i en filtre interférentiel vert.

II) Pouvoir Rotatoire

Proportionnel à l'épaisseur et à $1/\lambda^2$

Expérience 1 : Analyseur et polariseur croisés. Lame mince entre les deux. 50 % du spectre passe. On tourne l'analyseur de 90 degrés. On récupère l'autre partie du spectre. Montrer que c'est invariant par rotation de la lame. Couleurs complémentaires.

Expérience 2 : Mesurer $\Delta\phi$ pour une longueur d'onde (Hg + filtre interférentiel). Vérifier avec la valeur du *Sextant*. Ce n'est pas la même longueur d'onde, mais faire un produit en croix avec λ^2 . Attention l'incertitude sur l'angle apparait deux fois dans la mesure.

Expérience 3 : Effet Faraday. Détermination de la constante de Verdet. On peut mettre l'électroaimant avec B dans un sens ou dans l'autre pour faire l'ajustement sur une plus grande plage. Mettre un polariseur en entrée même si le laser est déjà polarisé, cela permet aussi d'atténuer le laser, ce qui fera qu'on pourra l'annuler avec l'analyseur, et avoir une lecture simple du résultat. Attention à la courbe d'hystérésis si B n'est pas mesuré à chaque fois.

Intérêt : isolateur optique.

M14 : Polarisation des ondes EM

Tout-en-Un PC/PC*. Travailler en lumière verte (Hg + filtre) dès lors qu'il y a une lame.

Remarque : On notera qu'en pratique, il est très difficile d'obtenir la polarisation absolue de la lumière, car les polariseurs n'indiquent effectivement pas quelle direction ils coupent vraiment, mais seulement un angle avec un offset. On pourra s'en convaincre en essayant de mettre des polariseurs de types différents en configuration croisée en ne se basant que sur les angles indiqués. Ce n'est pas grave, car ce montage est le seul où on a besoin d'une polarisation absolue (on peut quand même se débrouiller sans en fait), mais c'est à bien retenir !

I) Production d'ondes polarisées dans le domaine optique

Expérience 1 : Polarisation rectiligne à partir d'une naturelle. Petit blabla sur le polariseur dichroïque (polymères étirés).

Expérience 2 : Incidence de Brewster. QI + fente + lentille (prévoir que l'image sera faite après réflexion sur le miroir, c'est-à-dire écran décalé). Faire le zéro angulaire par réflexion de la fente sur la fente. Mettre à l'angle de Brewster le miroir, insérer polarimètre avant le miroir orienté dans le plan d'incidence de l'onde. Voir *Sextant*.

Expérience 3 : Lait (Origine naturelle de polarisation – les Vikings détectaient comme cela avec une lame biréfringente la position du soleil alors qu'il était sous l'horizon) bien dire que l'on verra toujours au niveau du faisceau les poussières en suspension, qui ré-émettent sans polariser, mais que ce n'est pas de la diffusion.

II) Étude d'un polarisation

Travailler avec des faisceaux circulaires, l'utilisation de fentes embrouille énormément la notion de polarisation.

Expérience 1 : On crée une polarisation elliptique à partir d'une $\lambda/4$ avec une orientation quelconque. Travailler avec une photodiode. Minimum, maximum de l'ellipse avec un analyseur en sortie. Protocole de la $\lambda/4$ pour avoir par une autre méthode l'angle de l'ellipse³⁴. Voir le *Sextant*. Comparer les résultats pour les deux techniques.

III) Loi de Malus

Expérience 1 : Ondes centimétriques et loi de Malus. Bien écarter les cornets (prendre le cornet portable). Ajuster I/I_0 en fonction de l'angle. Bien recouvrir la totalité du cornet par la grille à chaque angle. Attention, bien fixer la grille à un support tournant, et il ne faudra surtout pas la bouger pendant la prise de mesure; on vérifiera préalablement aux mesures que la grille couvre convenablement la plage d'angle voulue. On se placera près du maximum d'intensité pour minimiser l'erreur relative. On notera que parfois, mettre la grille augmente l'intensité mesurée, ce n'est pas aberrant, car celle-ci transforme une onde plutôt sphérique en onde plutôt plane.

IV) Interférences en lumière polarisée

Expérience 1 : Polarisation croisée + Fresnel Arago. Utiliser le laser auto collimaté car perte de luminosité avec les polariseurs. Bien mettre un polariseur en entrée même si le laser est déjà polarisé. Voir le protocole dans le *Sextant*. Ouverture possible sur la complémentarité.

34. En pratique, on a besoin ici d'une polarisation absolue si on suit les protocoles des manuels, et ça risque de foirer. Une possibilité est de tout repérer à partir de la direction de polarisation donnée par le polariseur initial, on ne faisant que des décalages d'angles. Nous laissons le lecteur méditer sur comment faire cela.

M15 : Production et mesure de champs magnétiques ☆☆☆

Introduction Le fil conducteur est la montée en puissance des champs mis en jeu et le coté très pratique des bobines (on pilote par le courant qu'on maîtrise très bien).

I) Le champ magnétique terrestre

Expérience 1 : Manip. QUARANTA

Prendre 5 spires. Variation en I. S'éloigner de toutes les autres sources magnétiques. Les branchements se font du même côté de la plaquette.

II) Capteurs magnétiques

Expérience 1 : Présentation sonde effet Hall.

Avantages : réactivité, sensibilité. Mais ne peut mesurer à l'intérieur d'un milieu magnétique.

Expérience 2 : Fluxmètre + intégrateur + oscillo en singleshot ou en mode défilement. *Quaranta électricité*

Avantage : peut mesurer à l'intérieur d'un matériau. Inconvénient : sensibilité, encombrement.

Expérience 3 : Calcul du champ magnétique max dans un aimant droit par le fluxmètre.

Quelques mots sur la fabrication des aimants permanents.

III) Champs pilotés par des bobines

Relativement faibles. Facilement ajustable par l'intensité.

Expérience 1 : Bobine épaisse. Table traçante (on peut aller relativement vite, attention à bien prendre la longue sonde, qui mesure des champs sur sa direction, et pas perpendiculairement!) Ajustement par la formule du solénoïde fini (qui est d'ailleurs donnée dans la notice, et au programme de la plupart des classes prépa de deuxième année!).

Expérience 2 : On allume la seconde bobine et éteint la première. Même sens puis sens opposé. On somme le champ sur IGOR dans les deux configurations, parler des propriétés de superposition des solutions dues à la linéarité des équations de Maxwell. Envoyer 5V dans chaque bobine. Pour la formule regarder le *Quaranta électricité* à magnétostatique. Dire les avantages de chacune des deux configurations. Évoquer les arguments de symétries.

Expérience 3 : Configuration anti. Ajuster la courbe en entier. Puis ajuster la partie linéaire. Bien prendre en compte les incertitudes et regarder le χ réduit pour s'assurer de la validité du modèle linéaire. Citer l'intérêt pour le piégeage des charges.

IV) Champs plus forts

On s'aide de ferromagnétiques. Plus difficile à piloter.

Expérience 1 : Champ dans l'entrefer d'un électro-aimant.

Fluxmètre. $B = \frac{\mu_0 n I}{\frac{L_s}{\mu_r S} + e}$. (Montrer que e est grand devant le second terme.) C'est le régime linéaire. Puis saturation. Vérification de la loi linéaire $B=f(I)$. Dire que c'est la courbe de première aimantation. Mesurer e au pied à coulisse électronique. Faire plusieurs graphes avec différents e si possible.

Conclusion Champs pulsés, champs tournants.

M16 : Milieux magnétiques ☆☆☆

I) Différents milieux magnétiques

Expérience 1 : Bâtonnets Diamagnétique (Bi) inductif Lenz moment opposé au champ va vers le champ faible, Paramagnétique (W) va vers le champ fort, Ferromagnétique (Ni) effet beaucoup plus intense que paramagnétique. Visualisation en les mettant dans l'entrefer de l'électroaimant.

Expérience 2 : Transition ferro/para. Thermomètre avec un bout en fer qu'on chauffe, sur lequel est accolé un bouclier thermique et un aimant, attaché par aimantation tant que le fer est ferromagnétique. Mesurer la température à la montée à la descente, ça double le nombre de mesures, et c'est gratuit (alors pourquoi s'en priver ?). Noter que la température que l'on doit obtenir doit techniquement être inférieure à la température de Curie, car l'aimant tombe quand la force entre lui et le thermomètre n'est plus suffisante pour compenser son poids.

II) Milieux paramagnétiques

Expérience 1 : Susceptibilité FeCl_3 . BFR 4. Éventuellement faire un ajustement en faisant varier B. Attention à la différence entre notre expérience et la formule du BFR. Penser simplement à $P = P_{\text{atm}} + \text{conservation du volume}$. Rappel, seul le champ magnétique à l'interface a de l'importance. Attention $\chi_{\text{solide}}/\chi_{\text{solution}} = \rho_{\text{solide}}/(\rho_{\text{liquide}}x_{M,\text{FeCl}_3})$. Focaliser sur un des cotés du tube pour avoir une mesure propre de la hauteur. Dire que l'eau est diamagnétique. Voir *Quaranta, électricité à Paramagnétisme et Diamagnétisme* pour avoir les valeurs de la susceptibilité pour l'eau et le FeCl_3 .

Expérience 2 : Paramagnétisme de l' O_2 , avec entonnoir en cuivre rempli d'azote liquide. Savoir que la température de vaporisation du dioxygène (88K) est bel et bien supérieure à celle de l'azote (77k), ce qui permet de s'assurer qu'on liquéfie bien de l'oxygène. Demander l'aimant le plus fort (celui qui se visse). Montrer que l' O_2 va vers le pôle le plus proche, indépendamment de sa polarité.

III) Milieux Ferromagnétiques

Expérience 1 : Cycle d'hystérésis. *Quaranta IV Électricité – BFR 4*

Bien prendre le 220 vers 110 pour l'alternostat. Et deux bobines 250 250 spires. Mettre un rhéostat béton sur le primaire pour récupérer l'intensité.

(Ne pas) mettre l'AO. Garder les mêmes composants électriques et faire un RC. Calcul du champ rémanent et du champ coercitif **lorsque l'on est à la saturation!** Conclure quant à la nature dure ou douce du ferro. Comparer aux valeurs dans le Tout-en-Un PSI/PSI* ou du BFR4 ou autre.

M17 : Métaux ☆✱

I) Propriétés électriques

Expérience 1 : Mesure à 4 points de la conductivité du cuivre (faire avec un générateur de courant, et suivre avec deux multimètres.) *Quaranta thermodynamique* Régression linéaire sur U,I. – Loi de Matthiessen $R(T)$ de façon qualitative dans température ambiante et dans un bain eau glace. On peut essayer d'avoir cette loi plus de façon quantitative, mais cela demandera une grande précision de manipulation, de la patience, et pas mal de temps. Citer l'application à la résistance de Platine. Comparer aux non-métaux.

II) Propriétés thermiques

Expérience 1 : Mesure de la conductivité thermique du cuivre. *Notice et Quaranta thermodynamique*. Barreau globalement isolé sauf refroidi et chauffé aux extrémités. Évoquer les pertes mais elles sont difficiles à évaluer. $P_{Joule} = (L/s\lambda)\Delta T$
Comparer aux non-métaux.

Expérience 2 : Loi de Wiedemann Franz – lien avec la conductivité électrique. $\lambda/\gamma T = constante$. Connaitre sa signification physique, à savoir que l'on suppose les modèles classiques exactes, et que la conductivité électrique et thermique des métaux n'est due qu'aux électrons.

III) Propriétés mécaniques

Expérience 1 : Module d'Young par l'Elastica. Attention au facteur 2 entre la fréquence de passage devant la fourche optique et la fréquence du mouvement. Celui-ci est constant sur une énorme plage de température. Les métaux sont déformables (grand module d'Young), cela peut être pratique pour les constructions.
Expérience 2 : Changement de variété allotropique du fer CFC (0.74) -> CC (0.68) quand ça refroidit ; on chauffe au rouge le fil tendu avec une masse en son centre, puis on coupe l'alimentation. Mettre une masse importante. Fils de sécurité et mettre le contact sur le haut des grenades. Attention, cette manip peut facilement être considérée comme hors-sujet, car il faut justifier en quoi cela décrit une propriété typique des métaux, ce qui n'est pas forcément évident. Cf. notamment des exemples triviaux tel le diamant et le graphite.

Expérience 3 : Mesure du coefficient de tension de surface d'un métal liquide par stalagmométrie, alias la gouttométrie. Peser 30 gouttes en les faisant tomber de la seringue. Bien prendre son temps pour faire les gouttes les plus grosses possibles. Rester dans l'acide car sinon on a oxydation très rapide du métal à l'air. Le bilan des forces quasi-statique est fait pour le rayon critique où la goutte tombe : $\Pi + 2\pi r_{int}\gamma = mg$. On a le volume de la bille par son poids et sa densité. Attention, il est très facile de se tromper sur la prise en compte de la poussée d'Archimède. Lorsque la goutte pend dans l'eau, la balance pèse déjà une masse différente³⁵. Cependant, la différence de masse mesurée entre l'acide seul et l'acide et les gouttes au fond (donc sans la seringue) donne directement la masse de métal injectée. (Pérez thermo, Quaranta Méca ou Gouttes perles et ondes).

35. Si je mets un bac d'eau sur une balance, et que je suspends un objet dans ce bac, je vais mesurer une augmentation de poids sur la balance qui est égal au poids d'un volume d'eau égal au volume de l'objet mis dans l'eau, cela s'obtient très facilement avec la poussée d'Archimède, et le théorème des actions réciproques.

M18 : Matériaux semi-conducteurs ☆✱

Rappel : Intrinsèque : ne dépend pas du dopage, kT haut, donc suffisamment d'énergie pour créer des paires électron-trou, ce qui équivaut à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Ce type de porteur est alors très majoritaire devant ceux dus au dopage, ce qui fait que les propriétés de conduction dépendent plus de ce dernier. Extrinsèque : dépend du dopage, car les électrons ou trous apportés par le dopage contribuent majoritairement à la conductivité.

Il faut savoir ré-expliquer rapidement la conduction en fonction de la température : excitation des défauts qui augmentent la conduction par l'augmentation du nombre de porteurs. Augmentation du nombre de phonons à nombre de porteurs fixés. Puis quand on atteint l'énergie du Gap, augmentation considérable du nombre de porteurs par création de paires électron-trou.

Demander Ashcroft et Kittel, ainsi que le *QUARANTA Électronique*.

I) Propriétés de conduction des semi-conducteurs

Expérience 1 : Résistivité avec la température. [Ge dopée p, plaquette cassée avec beaucoup de slots dont le I constant] Faire l'acquisition automatique avec suivi par l'enregistreur d'Igor. Mettre les calibres au minimum possible, cela permet juste d'avoir une mesure plus précise. Faire observer les deux zones, faire un ajustement sur la zone exponentielle pour remonter au gap. $\ln(R)=a+b/T$.

Attention Il faut mettre la température en K, et la température donnée par la plaquette est la différence avec la température ambiante.

Expérience 2 : Densité, signe des porteurs. Utiliser la [dopée n]. Calculer la résistivité très vite (on en a besoin pour les calculs). Manipulation avec effet hall. $V_{\text{hall}} = I/(neb) B$. Il faut régler le potentiomètre à $I=0$ pour avoir V_{hall} égale à zéro hors du champ magnétique. La double mesure de la résistance et de la tension de hall permet d'obtenir les deux informations sur le semi-conducteur. Ne pas mettre les pièces tronçonnées dans l'électroaimant, on veut un champ uniforme.

Dire qu'il y a un facteur 10^{10} entre la tension hall d'un semi-conducteur et celle d'un conducteur métallique, d'où son utilisation pour fabriquer des teslamètres.

II) Propriétés optiques

Expérience 1 : [Phosphore de Gallium] QUALITATIF de la couleur du semi conducteur on déduit son gap.

Expérience 2 : gap semi-conducteur GaP. On peut soit le faire au monochromateur avec observation directe, soit le faire à l'USB, en regardant le graphique en transmission. On en déduit le gap du semi-conducteur. On peut noter qu'on n'aura évidemment pas une simple marche type Heaviside, car il faut prendre en compte la forme exacte des bandes de conduction et de valence.

III) Application

Expérience 1 : Capteur de luminosité, temps de réponse. Photorésistance. DEL haute luminescence dans laquelle on envoie des pulses. Bien éclairer tout le photorécepteur. Prendre une résistance de l'ordre de 100ohm et bien se mettre dans le noir. Voir le *Sextant*. Faire ensuite le même montage avec une photodiode qui a un temps de réponse bien plus rapide et montrer que le temps d'émission du laser est bien négligeable devant celui de la photorésistance, pour être sûr que c'est bien le temps de réponse du capteur que l'on mesurait.

M19 : Effets capacitifs ☆**I) Caractéristique géométrique d'un condensateur**

Expérience 1 : Effet de la distance. Ne pas oublier de soustraire les effets de bords qui sont dans la notice. Pour le RCLmètre, utiliser des coaxiaux Banane/Banane et relier les masses à la borne Guard. Une alternative est de n'utiliser que des câbles bananes et de ne pas utiliser la borne de garde, car ces câbles n'ont quasiment pas d'effets capacitifs. C'est à méditer.

Expérience 2 : Influence de la présence d'un diélectrique. Pour être clair, on peut faire le petit dessin à la Feynman, qui se trouve dans ses cours au moment où il présente les diélectriques.

Expérience 3 : Capteur de niveau d'eau. Dans la Notice est précisé le comportement fréquentiel du capteur. Un schéma électrique y est accolé. Penser à bien utiliser le LCRmètre avec la fréquence où l'eau peut être considérée comme conductrice, et où le système se comporte bien comme la capacité voulue. (Si besoin de temporiser, on peut éventuellement faire cette étude fréquentielle, c'est peu ou prou un diagramme de Bode). Mettre l'éprouvette sur un Boy, le monter délicatement dans l'eau (du robinet), et mesurer les variations de capacité, qu'on vérifiera bien comme étant linéaire avec la hauteur d'immersion du capteur. On appuiera ici l'influence de la géométrie du condensateur sur sa capacité. Il est préférable de prendre les mesures en montant l'éprouvette ; autrement une couche d'eau peut rester sur les tiges, couche qui sera bien mesurée comme surface de contact (l'eau est conductrice dans le montage) et faussera l'expérience. Si on a un peu de temps et qu'on s'ennuie, on peut aussi vérifier avec les deux bâtons indépendants qu'on déplace dans l'eau à hauteur fixée que l'eau est bien conductrice, et qu'un déplacement latéral dans l'eau ne change pas la capacité du tout.

II) Caractère non idéal des capacités

Expérience 1 : Mesure par pont de Sauty. Transformateur d'isolement pour déterminer l'équilibrage des ponts.³⁶ *Quaranta électricité*.

Expérience 2 : Mesure d'une capacité chimique (prendre celle avec un facteur de qualité pourri.)

III) Effets capacitifs

Expérience 1 : Limitation du temps de réponse de la photodiode (prendre celle de la modulation pour le transport par fibre optique). $\tau = RC_{tot}$. Bien prendre en compte toutes les capacités, celle de la diode (regarder dans la notice), celle des câbles (éviter autant que faire se peut les coaxiaux qui sont capacitifs), celle de l'oscillo. Bien polariser la diode en inverse (on peut mettre de 10V à 50V, je conseille 10V car les défauts capacitifs sont plus présents).

36. Attention, il faut noter que le transformateur d'isolement interagit a priori avec le circuit, mais que ce n'est pas le cas si la tension à ses bornes est nulle, comme lorsque le pont est équilibré.

M20 : Induction, auto-induction

I) Auto-induction

Expérience 1 : Inductimètre numérique *Quaranta tome 3*. On exploite le caractère dérivateur du circuit RL. En injecte un signal triangulaire, on ajuste la fréquence (et la résistance) pour récupérer un signal carré. On trouve par le rapport des amplitudes crêtes à crêtes la valeur de L. Comparer à la valeur trouvée au LCRmètre. Faire ce calcul sur la bobine de Helmholtz, on s'en servira plus tard.

Expérience 2 : Étincelles de rupture, circuit comportant une très grosse inductance (de l'ordre du Henry) et une lime. Alimentation 10V. Mettre une diode de roue libre en parallèle pour montrer la protection.

II) Induction mutuelle

Expérience 1 : Inductance mutuelle (montage type transformateur). On retrouve la valeur de l'inductance mutuelle par le rapport des tensions en entrée et en sortie. La formule est dans le *Quaranta d'électricité*. Ajustement de la mutuelle en fonction de la distance, $M_0/(x(x-R)^2)$ ($+M_1$). Cf le DL en r/R sur la formule $M \propto \iint \frac{dl_1 dl_2}{r}$ ³⁷. En pratique, ce calcul ne semble pas adapté à la mesure réelle, les approximations étant trop grossières. On pourra alors se contenter de simplement mesurer et discuter qualitativement l'inductance mutuelle fonction de la distance. Il est aussi possible de faire une expérience alternative.

Coefficient de couplage et comparaison qui donne $\theta = M/\sqrt{L_1 L_2}$. Montrer qu'il est inférieur à 1.

Théorème de réciprocité montrer que l'inversion des bobines ne change pas M.

III) Propriétés générales de l'induction

Expérience 1 : Principe de Lenz, Chute d'un aimant.

Faire le beau dessin de Jemi, très clair en terme de variation du flux sur une boucle de hauteur fixée sur le tube, parler des courants de Foucault.

S'arranger pour écarter un maximum les bobines mais il faut être à la vitesse limite. Pour cela il faut avoir un crête à crête identique pour les deux pics.

Faire 10 lancers pour le cuivre, 10 lancers pour l'aluminium. Vérifier que σV_{lim} est constant car l'aimant qui chute est le même. Voir BUP 822 ou 823 (mots clés induction ou chute freinée) pour la théorie. Remarque : a priori, l'épaisseur du tube est importante mais comme les courants sont pelliculaires à cause de la grande conductivité des métaux en question, on a pas à s'en soucier.

Expérience 2 : Principe du flux-mètre. Montage intégrateur. Oscillo en single shot ou en mode défilement. *Quaranta électricité*.

³⁷. Plutôt qu'un DL, on peut aussi simplement présenter une formule type champ dipolaire, justifiée ou pas par un développement multipolaire, et dire qu'on s'attend à une décroissance en r^3 . C'est un peu avec les mains, mais les conditions de validité du DL précédent sont aussi un peu approximative.

M21 : Production et Conversion d'énergie électrique ☆*

Introduction Demander de but en blanc 8 WATTMÈTRES. On appuiera sur le coté conversion de puissance. Connaître les caractéristiques de ce qu'on trouve sur le marché.³⁸.

I) Production [Panneau Solaire] Sextant, à photopile, bien suivre le livre.

Expérience 1 : Icv et Uco donnent une idée de la charge optimale.

Expérience 2 : Tracer $P=P(R)$ pour déterminer la charge optimale. Utiliser un voltmètre ainsi qu'un ampèremètre car le wattmètre n'est pas assez précis.

Expérience 3 : Rendement (attendre 10%) par la thermopile. Faire attention aux surfaces et à la distance.

II) Conversion Continu-Continu [Hacheur sur plaquette] Duffait Agreg

Prendre une charge purement résistive. N'utiliser ici que des wattmètres sinon il y aura des problèmes dus à la forme du signal. Montrer le petit moteur qui ne marche que pour 3V. Dire qu'il va falloir abaisser la tension.

Expérience 1 : Puissance initiale. Brancher directement une alim 12 V sur cette charge et mesurer P_0 au wattmètre. Ce sera la puissance à diviser par 4.

Expérience 2 : Réglage du signal d'entrée : on alimente l'interrupteur commandé puis on envoie un signal TTL de 1kHz de rapport cyclique 1/4. Ajuster le rapport cyclique pour fournir la puissance voulue à la charge, i.e. $P_U = P_0/4$. Calcul du rendement qui est le rapport de cette puissance délivrée à la charge sur la puissance fournie par l'alimentation.

Expérience 3 : Lisseur. On rajoute une diode de roue libre qui supporte 1A et une bobine de lissage. Visualiser la tension à l'oscillo, dire que le but est de lisser !

Expérience 4 : Mesure de rendement. A cause du lissage, le rapport cyclique requis pour diviser la puissance par 4 n'est plus, il faut donc réajuster α pour retrouver $P_0/4$.

Expérience 5 : Faire fonctionner le petit moteur 3V.

III) Conversion Alternatif-Alternatif [Transformateur] Quaranta IV

Transformateur fermé. Alim 220 V vers 110 V. Wattmètre en amont, voltmètre et ampèremètre après le transformateur.

Expérience 1 : Détermination de la charge à utiliser. A partir de P_{norm} écrit sur le transformateur, on calcule i_{norm} dans le circuit secondaire et on choisit une charge rhéostat qui peut supporter un peu plus que i_{norm} . On fixe la tension d'entrée sur le primaire à 110V.

On peut également tracer P_{charge} en fonction de R comme dans la partie I.

Expérience 2 : Mesure des pertes fer : on se place en charge à vide et on mesure la puissance injectée via un watt-mètre. Note : elles sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le ferromagnétique (donc ne dépend pas de la charge).

Expérience 3 : Mesure des pertes cuivre. Ce sont les pertes par effet Joule dans les résistances des enroulements (elles dépendent de I). On relève donc i dans le primaire lorsque la charge est en place. On **baisse** l'alternostat, on se met en court-circuit, on réajuste l'intensité pour être à égalité avec celle toute juste relevée. On relève la puissance des pertes cuivre.

Expérience 4 : Rendement, on vérifie que $P_{inj} = P_f + P_{charge} + P_c$.

IV*) Conversion Alternatif-Continu [Plaquette Redressement-Filtrage]

Expérience 1 : Fonctionnement (expliciter pas à pas.)

Expérience 2 : Évaluation de la résistance de sortie. Ajustement pour déterminer la résistance de sortie. (Ne pas utiliser que les résistances sur la plaquette.)

Expérience 3 : Rendement.

Remarque : Tout est dans la notice. Ce n'est pas une manip bien compliquée, mais il faut l'avoir bien préparée en amont, et être capable de présenter le tout clairement à l'oral, ce qui n'est pas forcément évident.

³⁸. Typiquement le transfo utilisé est construit pour avoir un mauvais rendement, et donc pour pouvoir avoir une présentation plus sympathique, mais en pratique le rendement est au dessus de 99%, et heureusement !

M22 : Amplification de signaux ☆*

Bibliographie : Hprépa, Électrocinétique PCSI MPSI et Krob.

I) Amplification en tension

NB : Même si la plaquette indique + ou - 12 V, il faut alimenter les AO en + ou - 15 V pour avoir les valeurs prévues dans la notice. Pour cette partie on utilisera un AO **TL741** pour d'une part montrer ses limitations et d'autre part parce qu'il est bien approximé par un ordre 1.

NB : Ce montage est fait pour amplifier des signaux, la modélisation de l'AO est vraiment probante pour des gains conséquents (>3).

Expérience 1 : [AO inverseur] But du montage et Impédance de sortie. Présentation du montage. **Mettre une charge**. Avec deux voltmètres configurer les résistances pour avoir un gain de 5. Vérifier que l'on a bien l'amplification en tension. Varier la charge pour illustrer que l'impédance de sortie est nulle \rightarrow parfait pour une amplification de signal.

Expérience 2 : Limitations de l'AO. Tension (on dépasse les + ou - 15V). Intensité de sortie (varier la charge de sortie), comparer aux valeurs tabulées (Krob ou Hprépa PCSI). Slew rate.

Expérience 3 : Étude fréquentielle. Diagramme de Bode par Igor. Faire l'étude entre 1kHz et 500kHz, 0.10V entrée. Pour des gains en décibels de 10, 20, 30. Au dessus de 500kHz, slewrate et la phase déconne. Ça foire parfois au début il faut relancer. Vérification du produit gain-bande, identifier le -3dB par les 45° de la phase.

Conclusion : Ça marche plutôt bien mais ça a ses limites.

II) Étude d'un amplificateur de puissance : Push-Pull Courbes dans Quaranta et explications dans le Duffait

Le but est d'amplifier un signal en puissance. Pour cela on fera un push-pull qui aura la même tension de sortie que le signal d'entrée mais qui pourra suivre sur n'importe quelle charge.

Expérience 1 : [Demi push-pull] Présentation et fonctionnement (montrer signal entrée, sortie). Les transistors fonctionnent en classe C. Noter que l'alimentation continue ne fournit de la puissance que lorsque le transistor ne bloque pas. Afficher l'intensité délivrée dans chacune des branches du push-pull avec deux résistances. (Utiliser l'oscillo 4 voies au phosphore)

Expérience 2 : Monter le push-pull. Vérifier que le gain est de 1 en tension. Visualiser quelle branche fournit et quand sur l'oscillo à quatre voies. Montrer la distorsion, l'expliquer, faire éventuellement une FFT pour montrer l'enrichissement en fréquence.

Expérience 3 : Correction de la distorsion. Faire passer les transistors de classe C à classe B en rajoutant une diode.

Nouvelle FFT, montrer que l'on a supprimé les fréquences parasites.

Expérience 4 : Impédance de sortie. Charge en sortie. On a $V_s = R_u I_u = E - r I_u$. Attention, ne pas envoyer trop fort en entrée. On trace $V_s=f(I_u)$ grâce à ampèremètre et voltmètre.

Expérience 5 : Rendement de puissance. Le GBF d'entrée ne fournit quasiment rien. On place deux wattmètres, l'un derrière la source, l'autre devant la charge. Calcul du rendement (dire que la charge ne fait pas varier le rendement, tant mieux!) Rendement attendu autour de 65%.

Expérience 6 : Déformations hautes fréquences : les montrer mais sans tracer de Bode, montrer qu'on peut corriger les corriger en changeant les résistances qui alimentent en courant les diodes.

Parler de la correction en instabilité des transistors par rajout de résistances de contrôle.

M23 : Mise en forme, transport et détection de l'information ☆☆☆

Introduction : Montrer la modulation FM du début à la fin. Essayer de faire un maximum de branchement face au jury. Insister sur l'intérêt pratique.

I) Modulation

*Expérience 1** : Modulation d'amplitude. 2 GBF multiplicateur, montrer l'écartement des pics en FFT. Mettre un rapport de 100 entre modulante et porteuse.

Expérience 2 : Modulation FM. Expliquer le principe, formule, problématique. GBF à 440Hz (attention ne pas trop envoyer en tension) qui module une porteuse à 50kHz. Déterminer le taux de modulation m par la formule $\Delta T \frac{f_p^2}{f_m}$. Regarder en TF la bande de Carson. Vérifier qualitativement que m est lié à la bande de Carson (par le critère des -20dB, attention il y a un facteur 2 entre les deux définitions...).

II) Transport

Expérience 0 : Citer les antennes hertziennes.

Expérience 1 : En fait, la fibre optique, c'est de la merde, donc on va faire autre chose. On va mesurer l'atténuation d'un coax. Mettre un GBF en sinus sur trois coax (10kHz) de différente longueur sur les voies 50ohm de l'oscillo au phosphore. Mesurer l'atténuation. Pour être sûr, on peut mesurer l'un puis l'autre. Attention, pour les profanes, si on a 1% sur 100m, on n'a pas 0.01% sur 1m, ce sont les log qui se somment ! Mettre en dB, et comparer à la fibre optique. C'est pourquoi ici nous allons utiliser un coax (même de 1km si ça nous fait kiffer), mais dans la vraie vie on utilise autre chose. On note aussi qu'ici on a pas besoin de moduler, mais d'autres modes de transmission rendent cela nécessaire.

III) Démodulation FM

Bien montrer tout le long de cette partie des oscilloscopes où sont comparés signaux modulateurs, signaux démodulés ainsi la porteuse modulée et la porteuse accrochée.

Expérience 1 : Présentation, principe PLL. Tracer Δf_c et Δf_s en fonction de $V_e V_s$. Ajustement linéaire pour la seconde. Bien penser à débrancher le BNC du GBF pour relever les fréquences.

Expérience 2 : Démodulation sur un La 440 Hz. Il est important de bien comprendre que c'est la PLL qui nous permet d'obtenir la fréquence instantanée du signal, qui contient en pratique l'information. Ce n'est pas du tout trivial ! On peut jouer ici sur tous les paramètres selon qu'on est à l'aise ou pas, pour montrer les effets sur les différents signaux.

Expérience 3 : On envoie le signal modulé dans la section Modulation FM. Application à la radio + Haut parleur, amplificateur de puissance. Jouer sur le filtre pour améliorer le son, s'assurer de bien couper la porteuse. Ajouter éventuellement un filtre passe-bande avant l'amplificateur à la sortie.

Plan alternatif : Pour ceux qui sont moins à l'aise sur la modulation/démodulation, il peut être plus adapté de faire un plan un peu différent. Dans une première partie, on expliquera le concept de la mod/démod sur celle d'amplitude. On montre l'effet des paramètres de la modulation via la TF, en jouant avec la position et l'écartement des pics, puis on démodule avec un détecteur de crête, en jouant de même avec les paramètres. On fait la même deuxième partie sur le transport. Et on fait une troisième partie sur la modulation de fréquence beaucoup plus soft, sans présenter la bande de Carson, sans étudier en détail la PLL, mais en montrant simplement pas à pas comment on va moduler et démoduler notre signal. En fait, c'est à chacun de choisir à quel point il met de l'amplitude et de la fréquence.

Remarque : Il est important de comprendre qu'avec des capteurs de temps caractéristique de détection intermédiaire entre la porteuse et la fréquence du signal, on fait de la modulation sans s'en rendre compte. Par exemple, si on module un signal en le mettant dans l'intensité d'un laser, en fait la porteuse est à la fréquence optique, et est moyennée automatiquement en intensité dans la photodiode. On a bien réalisé une modulation/démodulation d'amplitude.

M24 : Acquisition, analyse et traitement des signaux ☆***

I) Acquisition

L'idée est de tout ramener à une grandeur facilement numérisable : une mesure du temps !

Expérience 1 : Voltmètre numérique. Convertir une tension continue en un intervalle temporel.

Prendre oscillo à 4 voies. Générateur de rampes triangulaires (justification dans le *Duffait*). Tension 0 vers +12V (c'est la saturation de l'AO). Comparateur avec une tension continue délivrée par une alimentation stabilisée. On visualise à la sortie du comparateur.

Brancher chronomètre numérique. En mode chrono, total pour sommer, E1 ou E2. Mettre en rampe longue pour montrer au jury le fonctionnement. **Attention** : il faut bien démarrer quand la rampe est à zéro, sinon on compte le mauvais intervalle (le chrono déclenche aux changements et se fout des fronts montants ou descendants). Il n'y a pas de façon simple dans le cadre de l'agrég de s'assurer qu'automatiquement on déclenche bien quand la rampe est en position basse.

Remonter à la tension. Estimer les incertitudes. Les relier au chronomètre. Possibilité ou non de moyenner.

Expérience 2 : Échantillonneur, bloqueur. *Duffait*. Transformer l'analogique en constant par morceau. Ne pas suivre complètement le bouquin. Mettre directement un générateur de pulse. Utiliser un relais rapide. Expliquer le principe, jouer avec les paramètres. Sous échantillonner montrer ainsi le critère de Shannon. Éprouver ensuite le système en augmentant la fréquence. Parler des performances de l'oscilloscope utilisé ici, comparer à la résolution du système présenté.

Conclusion : On a montré comment mesurer une tension continue, puis comment transformer un signal quelconque en constant par morceaux ; nous savons donc faire un voltmètre, même si nous n'allons pas aller plus loin ici.

II) Analyse du signal

On travaille avec 2 DELs + photodiode (2 sinus, offset à 5 V, amplitude 2.5V et 0.1V). Bien travailler en DC!

Expérience 1 : FFT. Identification des fréquences. Recouvrement. Séparation de fréquences. Méthode NUMÉRIQUE.

*Expérience 1** : On peut également travailler en FFT sur le signal échantillonné précédemment par l'échantillonneur bloqueur. Il est alors pratique de montrer le recouvrement ce qui est difficile à faire directement car la FFT de l'oscillo est automatiquement réglée pour ne donner qu'une partie du spectre. L'intérêt avec le signal échantillonné par nos soins est qu'il introduit un nouveau pas temporel, situé entre le pas naturel de l'oscillo et le taille de la fenêtre.

On peut ainsi clairement montrer le recouvrement et les rebonds (assortir tout ça d'un graphe clair au tableau) des composantes fréquentielles sur les bords de la fenêtre de Fourier en jouant sur la valeur du pas temporel de discrétisation.

Expérience 2 : [Filtre de Sallen et Key en bande passante]. Suivre le *Hprépa PSI vieux modèle ou PCSI*. Mettre toutes les résistances en 1kohm sauf la variable en boîte à décade et les deux capacités en boîte à décades également. Woobuler et montrer que ça marche, ajuster la résistance variable (k peut aller jusqu'à 4.950) pour avoir un facteur de qualité maximum. S'extasier devant la largeur erwanesque du pic.

Envoyer un créneau inside, faire varier le S&K pour explorer les harmoniques, vérifier que l'on décompose bien le créneau en TF (fréquence et amplitude).

C'était une illustration du principe de la FFT de manière ANALOGIQUE, en approche filtrage.

III) Traitement

Expérience 1 : Amélioration du rapport signal sur bruit par détection synchrone. *Duffait*.

(signal/bruit : différence, en dB, de l'amplitude de la FFT au niveau du signal et au niveau du bruit...)

Contextualisation : on connaît la fréquence du signal portant l'information (c'est l'amplitude qui la code). Malheureusement un bruit blanc vient le cacher. Présentation de la détection synchrone. Faire le montage du bouquin, attention, la résistance B est en mode potentiomètre (merci clém-clém!) Vérifier la loi liant le signal continu à l'amplitude du sinus. Montrer absolument comment le signal est déguueeeuulaaass. Calcul signal sur bruit.

On remultiplie par la porteuse, on recalcule le rapport signal sur bruit. On s'extasie.

Ou on envoie un tout petit signal (entre 10 et 20 mV), en mode atténuation à la Ulysse à travers un coaxial

de 100m (il sera bruité, et de façon naturelle!), qu'on amplifie par un AO non inverseur à fort gain (prendre un TL071). Puis on effectue la détection synchrone avec un deuxième GBF de même fréquence. Travailler à basse fréquence pour la détection synchrone sinon battement à cause des deux GBF différents. Si ça réussit, c'est vraiment classe, car en partant d'un signal tout faible et bruité, on l'a amplifié en enlevant le bruit. Après coup cette dernière manipulation semble foireuse. Elle est en tous cas à considérer avec circonspection, et nécessitera peut-être quelques ajustements.

M25 : Mesures de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu) ☆☆☆**I) Mesure par comptage**

Expérience 1 : Mesure par comptage, principe du fréquencemètre [Plaquette], voir *Notice*. Expliquer le fonctionnement. Montrer qu'il faut choisir une porte large devant la période supposée du signal. Parler de l'incertitude suivant le rapport de la période du signal étudié sur la durée de la porte. Utiliser pour cette porte un GBF burst sur l'entrée commandée pour illustrer ces propos en faisant une mesure sur une très grande fréquence (sur une porte de 1s, c'est trop rapide!).

II) Mesure électrique [Pont de Wien Robinson]

Expérience 1 : Fréquence quelconque, équilibrage. *Quaranta électrique*. Ne pas oublier que $P=2Q$. Ne pas se servir d'un oscillo pour visualiser la tension du pont, ce serait absurde. Utiliser plutôt un voltmètre en alternatif. L'équilibrage est un minimum.

III) Mesure par comparaison

Expérience 1 : Mesure d'une fréquence de rotation d'un disque (prendre un hacheur optique) à l'aide d'un stroboscope. Faire le parallèle avec le critère de Shannon (si on sous-échantillonne, on se trompe de fréquence), en mesurant des sous-multiples et sur multiples de la fréquence. La bonne est la dernière (en augmentant) qui offre un trait immobile. On peut s'assurer d'une bonne précision (ajustement linéaire en fonction du sous-multiple de la fréquence de rotation).

Expérience 2 : Hétérodynage, (décalage de la fréquence d'un signal) en lien avec le fait que les filtres très sélectifs ne sont pas toujours accordables (exemple : radio, potentiomètre qu'on tourne), où qu'on ne sait parfois mesurer que des fréquences sur une plage donnée. Faire avec deux diapasons, l'un de fréquence connue et regarder les battements. Comparer à une mesure au fréquencemètre pourrie.

Expérience 3 : Détection synchrone appliquée à deux GBFs réglés sur la même fréquence. La période des battements donne la précision du GBF. On peut s'amuser à comparer deux GBFs de marque différente, un récent et un plus vieux, en supposant le récent exact, pour regarder l'erreur systématique du plus vieux. Ouvrir sur une calibration des GBFs par oscillateur à quartz et ensuite sur la définition de la seconde.

IV) FFT

Expérience 1 : Oscilloscope + Diapason

Remarque : Pour l'intégralité du montage, il est important de montrer qu'on se ramène toujours à une comparaison avec une mesure de temps de référence. Et toutes ces mesures se ramènent finalement à la définition de la seconde. Dans la première mesure, on a une fréquence de référence par le GBF. Pour le pont, les grandeurs électriques des composantes ont été mesurées grâce à des fréquences de références. Etc...

M26 : Mesures de longueurs ☆*

Introduction Le mètre c'est notre échelle. Définition rigoureuse de celui-ci. Avantages et inconvénients des différents types de mesure, place historique.

I) Méthode géométrique

Expérience 1 : Méthode de Thalès pour les montagnes, l'utiliser pour déterminer rapidement la hauteur du tableau, ou la largeur d'une salle.

Expérience 2 : Parallaxe. Utilisé pour les étoiles "proches". Plus ou moins précis. Coïncidence rangefinder. Utiliser les miroirs de "Brewster" avec angle. Le laser mime la trajectoire des rayons lumineux. Insister sur les incertitudes et la précision de la méthode. Cette expérience n'a pas abouti, car nécessitant de balader des lasers dans la pièce, à voir comment il serait possible de la rendre utilisable. Préférer notamment l'expérience qui suit...

*Expérience 2** : Triangulation. Formule de sinus. Utiliser deux goniomètres pour retrouver les angles. Parler des distances calculables beaucoup plus grandes que la base. Évoquer le calcul des distances spatiales par la parallaxe ou encore la triangulation que font naturellement les yeux et le cerveau et qui nous permet de voir en profondeur.

II) Méthode télémétrique

Expérience 1 : Télémétrie LASER. Distance terre lune avec une précision ahurissante. Se mettre à au moins 10 mètres. Citer le SONAR.

III) Méthode par luminosité

Expérience 1 : Type chandelle standard en astronomie. On observe la puissance reçue d'une ampoule sur support (il faut essayer d'avoir une surface d'émission à peu près sphérique). On suit par Thermopile + nanovoltmètre, sur banc optique. Même ampoule que pour le corps noir. Ajustement en $\frac{A}{(r-B)^2} + C$. Cela prouve bien l'efficacité de la méthode.

IV) Sondage de la matière par des ondes

Expérience 1 : Lycopodes, cf le montage diffraction.

Expérience 2 : Diffraction des électrons, cf la notice et la littérature.

Remarque : Noter qu'on regarde ici la diffraction par une superposition de motifs identiques, et que les facteurs de forme et de structure sont indépendants, ce qui nous permet d'observer soit l'un, soit l'autre. On regarde la forme sur les lycopodes, la structure étant aléatoire, et on regarde la structure pour la diffraction des électrons dans la poudre de graphite.

M27 : Systèmes bouclés

Introduction Relaxation : qui oscille entre deux états de fonctionnements. Oscillateurs quasi-sinusoidaux.

I) Stabilité et rétroaction

Références : *Tout-en-Un PSI/PSI** et *Krob*

NB : L'intégralité des développements formels pour les boucles de rétroaction sont faites avec un comparateur négatif sur la boucle de retour, ici il n'est pas présent et la FTBO utilisée dans les formules est en réalité -FTBO pour pouvoir les utiliser. Ce n'est jamais vraiment précisé mais l'avoir en tête pour ne pas dire de bêtises.

Objectif du Filtre de Wien : Après être passé dans l'oscillateur le signal doit revenir si possible en phase avec un gain supérieur à 1. Comme on veut un signal sinusoidale on veut qu'une seule fréquence soit amplifiée de la sortie d'où le filtre de Wien qui est passe bande. Son maximum d'amplification est de 1/3 pour sa fréquence de résonance qui est en phase.

Expérience 1 : [Pont de Wien] Étude en boucle ouverte. On cherche la fréquence de résonance (en mode XY ou avec les phases) et on cherche la résistance critique (**on la retient**) de sorte que l'on arrive à un gain de 1.

Expérience 2 : [Pont de Wien] Boucle fermée. On augmente la résistance jusqu'à observer des oscillations, on la note et on remarque que c'est la même que tout à l'heure à ϵ près. Bien noter que la saturation est à 15V, c'est celle de l'AO. Augmenter la résistance, noter qu'il y a deux facteurs de distorsion : sinus écrêté puis déformation.

Expérience 3 : [Pont de Wien] Mise en place des oscillations (on peut varier R ou C pour avoir des oscillations plus lentes, ça ira mieux pour ajuster par la suite), on se place juste en dessous de la résistance critique puis on bascule au dessus, singleshot sur synchronie et ajustement, relier à tous les paramètres du circuit. Dire que le fait d'avoir une équation différentielle qui a des solutions qui divergent est caractéristique des systèmes bouclés.

Expérience 4 : Application [Oscillateur à quartz] *Journeaux*, prendre un TL71. Montrer le seuil d'oscillations, faire varier tous les paramètres montrer que ça ne change pas la fréquence d'oscillations. C'est trop stylaid!

II) Corrections

Expérience 1 : Asservissement en température. Module Peltier/thermistance. Présentation. Vérification de la loi $\Delta V = V_m \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ en faisant varier R_1 . Allumer la thermistance pour accroître la fréquence des oscillations chauffage/refroidissement. Regarder la tension de basculement autour de R_2 pour s'affranchir de l'inertie. Tester pour plusieurs types de perturbations (chauffage plus ou moins fort).

Faire correction proportionnelle à la main.

Expérience 1bis : Asservissement en vitesse du moteur. Voir *Notice*.

III) Application

Expérience 1 : Présentation, principe PLL. Tracer Δf_c et Δf_s en fonction de $V_e V_s$. Ajustement linéaire pour la seconde. Ne pas oublier de retirer le câble pour relever les fréquences. Montrer le cycle d'hystérésis de la PLL par woobulation en triangle.

M28 : Instabilités et phénomènes non-linéaires

I) Dynamique d'un système non linéaire

Expérience 0 : Résistance + diode + GBF en série. Étude spectrale FFT (au borne de la diode), perte de la proportionnalité entrée sortie. Enrichissement en fréquence.

Expérience 1 : [Pendule pesant] Trajectoire pour des θ_0 différents. Visualisation dans l'espace des phases. (Se mettre en variables adimensionnées.)

Expérience 2 : Perte de l'isochronisme. Ajustement de la formule de Bordas.

II) Instabilités

Expérience 1 : [Elastica] Bifurcation sur-critique et ralentissement critique. Bien faire le niveau lorsque l'on est autour de la masse critique avec la petite vis. C'est très sensible : il faut pouvoir faire basculer autant à gauche, qu'à droite. Ne pas oublier le facteur 2 pour le calcul de la période. Ajustement de la période juste avant la bifurcation (la formule est dans la notice).

*Expérience 2 Fauvarque*³⁹ : Réalisation de la non-linéarité polynomiale cubique *Krob*. Acquisition sur l'oscillo relié à IGOR, ajustement de la fonction XY. Traitement FFT, montrer les fréquences triples. Évoquer que l'émergence de nouvelles fréquences relève fondamentalement des phénomènes non linéaires. Cf. notamment l'optique non linéaire...

Expérience 3 Fauvarque : [VDP], mixe entre le *Krob* et la notice de la plaquette. Partir de l'oscillateur harmonique, écrire l'équation différentielle, montrer les cycles limites et les signaux déformés.

Expérience 2 Allys : Oscillateur paramétrique électrique exact. *BUP oscillateur paramétrique*. Montrer les fréquences pour lesquelles on a instabilité. On s'intéressera à $2f_0$. Bien se rappeler que lorsqu'on fait varier un paramètre il faut garder tous les autres constants. Ajustement de l'amplitude de l'instabilité en fonction de l'écart à la fréquence centrale pour un seuil donné. Ajustement du seuil en fonction de la dissipation à une fréquence donnée. Ralentissement critique. Peut se faire au dernier chiffre significatif des GBFs bleus. Bien allumer et éteindre la tension à chaque fois. On obtient une trentaine de secondes si on est chaud.

Noter qu'il peut être plus simple de décrire physiquement l'amplification à d'autres fréquences que $2f_0$, même si finalement on fait la mesure à cette fréquence. D'autre part, il peut être utile d'ajuster le rapport cyclique des créneaux pour avoir une résonance plus poussée ($\sim 40\%$ pour f_0); cependant, la fréquence exacte de résonance va un peu changer, ce qui ne facilite pas la prise de mesure.

39. Certains ont testé cette expérience le jour de l'oral et il semble qu'elle n'a pas été très appréciée. Il faut être très précautionneux sur la façon dont on la présente et véritablement convaincre le jury de sa pertinence dans ce montage.

M29 : Ondes, propagation et conditions aux limites ✱

I) Propagation libre, relation de dispersion

Expérience 1 : Ondes à la surface de l'eau. *Quaranta. Mécanique.*

Ne pas oublier le grandissement. Mettre une règle entière (et propre) dans le bac **avant** de mettre l'eau, cela permettra d'avoir une valeur précise du grandissement sans souiller l'eau permutée ! On ajuste la formule totale modulo l'approximation des faibles profondeurs.

II) Notion d'impédance

Expérience 1 : [Câble coaxial] Mesure de l'impédance caractéristique par l'ajustement de la loi de Fresnel (attention à l'atténuation due au câble, pas besoin de la calculer, l'ajustement la fera naturellement disparaître). Noter qu'on met simplement le coax sur une impédance, et qu'on observe la réflexion. Calcul de la vitesse d'un pulse. On remonte à la capacité linéique.

Expérience 2 : [Câble coaxial] Adaptation d'impédance : montrer sur l'oscilloscope où l'on peut changer l'impédance d'entrée l'importance de l'adaptation d'impédance. Système générateur de pulse (branché sur oscillo CH1) + câble coaxial de 100m + résistance variable + câble coaxial de 100 m + oscillo CH2. On peut mettre les deux oscillos sur 50Ohm ou 1MOhm. Quand les deux sont à 50Ohm, ils absorbent entièrement. Si un des deux est à 1MOhm, on voit le rebond sur celui-ci, et il y a deux pulses sur le 50Ohm. Faire des pulses courts ! Juste une porte.

En bonus, si les deux sont à 1MOhm, on peut observer avec un sinus continu, et il y a simplement une cavité résonnante, où le générateur fournit l'énergie qui est dissipée ; en jouant avec la fréquence et l'impédance centrale, on peut mettre en avant des résonances.

III) Conditions aux limites et propagation guidée

Expérience 0 : Tube de Plexiglas. Guide d'onde sur l'équivalent d'un fibre optique.

Expérience 1 : Guide d'onde acoustique. Voir la notice associée au Tube. Pour faire les pulses, suivre le notice du générateur de fonction.

Banc optique. Commencer par accoler les piézo pour avoir le temps systématique à retrancher. On prendra le centre du pic comme référence. Mettre un pulse suffisamment court pour identifier un maximum. Être à la résonance du piézo.

Montrer avec le petit tube et le gros qu'il y a plus ou moins de modes propres se propageant. Rôle de filtre du tube.

Identification de ces modes dans le petit tube par la loi donnée dans la notice (relation sur les μ_{nm} qui vient de la relation de dispersion). Essayer d'incliner les piézo pour isoler les modes. Prendre les centres de pics. Ne pas oublier de retrancher le décalage systématique évoqué plus haut. Dire que "ce sont ici les CAL qui vont introduire une discrétisation des modes propres et de la dispersion". Être au point sur le phénomène physique qui n'est pas si trivial que ça. Attention à ne pas mettre les piezo dans le tube, mais à la surface, ou alors il faudra prendre en compte un écart dans la longueur du tube.

M30 : Acoustique

I) Propagation libre

Expérience 1 : Calcul de la vitesse du son dans l'air. Générateur de pulses, mettre sur banc optique, faire une régression sur la distance. Ne pas oublier d'enlever le retard systématique et de se mettre à la résonance du piézo.

Expérience 2 : Effet Doppler sur table traçante. Émetteur + récepteur accolés, commencer par se mettre à la résonance du piézo, vers 40kHz. Détection synchrone en utilisant la réflexion de l'onde sur une plaque de métal en translation, voir le *Duffait*, RC (10kohm et 0,3microF) suffisant pour cette manip. Attention ne pas oublier qu'il y a un facteur 2 du au trajet aller ET retour. On peut aussi faire se déplacer le récepteur. Discuter de la gamme de fonctionnement de la détection synchrone, de sa sensibilité vis-à-vis de la détection synchrone, de l'oscilloscope, de la porteuse... Application au doppler médical.

II) Ondes stationnaires

Expérience 1 : Ombroscopie. Générateur HF + oscillateur à quartz. Système optique : condenseur 7cm, fente, cuve (diaphragme, lentille de 10), écran. Attention, pour déterminer la fréquence des HF, il faut **absolument** utiliser un câble en mode induction enroulé autour des fils HF et brancher celui-ci sur l'oscillo. Réfléchir judicieusement à la façon de déterminer le grandissement du dispositif.

III) Effets des conditions limites

Expérience 1 : Guide d'onde acoustique. Voir la notice associée au Tube. Pour faire les pulses, suivre le notice du générateur de fonction.

Banc optique. Commencer par accoler les piézo pour avoir le temps systématique à retrancher. On prendra le centre du pic comme référence. Mettre un pulse suffisamment court pour identifier un maximum. Être à la résonance du piézo.

Montrer avec le petit tube et le gros qu'il y a plus ou moins de modes propres se propageant. Rôle de filtre du tube.

Identification de ces modes dans le petit tube par la loi donnée dans la notice (relation sur les μ_{nm} qui vient de la relation de dispersion). Essayer d'incliner les piézo pour isoler les modes. Prendre les centres de pics. Ne pas oublier de retrancher le décalage systématique évoqué plus haut. Dire que "ce sont ici les CAL qui vont introduire une discrétisation des modes propres et de la dispersion". Être au point sur le phénomène physique qui n'est pas si trivial que ça. Attention à ne pas mettre les piézo dans le tube, mais à la surface, ou alors il faudra prendre en compte un écart dans la longueur du tube.

Remarque : Nous sommes bien conscients qu'il n'y aura aucun son audible étudié pendant le montage acoustique, ce qui peut en stresser certains. Une autre manipulation peut être rajoutée dans ce but mais nous n'en avons pas trouvé de vraiment probante.

M31 : Résonances ☆☆☆

Introduction : Notion de forçage. Peut être fréquentiel, indiciel, impulsionnel. Aspect filtrage, un système résonant ne laisse passer que certaines composantes fréquentielles. Aspect amplification, gain, bande passante.

Exp. d'introduction : [Plaquette LC] Woobulation avec un seul RLC, faire varier R pour montrer l'apparition et l'évolution de la forme de la résonance.

I) Le modèle des phénomènes de résonance [RLC avec étude de U_c (passe-bas), suivre les valeurs du *Duffait*, bien vérifier au RLCmètre les résistances de chaque composante. Ne pas oublier celle du GBF.] Faire les deux expériences suivantes en parallèle avec deux circuits identiques.

Expérience 1 : Indiciel. Comment se manifeste la résonance et influence de Q? "Filtrage" par le système de l'Heaviside. Déterminer Q avec la formule, vérifier que cela correspond bien au nombre d'oscillation.

Expérience 2 : Fréquentiel. Faire plusieurs Bode (montrer phase) en préparation avec des Q différents (utiliser les mêmes R que pour l'indiciel). Calcul de la fréquence de résonance, de la BP. Ajustement : Hauteur de la résonance en fonction de Q. Insister sur la linéarité à grand Q. Faire le graphe de BP en fonction de $1/Q$. Éventuellement tracer pour grand Q Hauteur*BP.

II) Augmentation du degré de liberté

Expérience 1 : [Plaquette LC] Woobulation (mode XY, X, rampe de woobulation, Y sortie) augmentation du nombre de résonances avec le nombre de degrés de liberté (nombre de maille en LC). Montrer cette augmentation. Fixer le nombre d'oscillateurs, calculer les fréquences de résonance, vérifier sous igor la loi dans la notice.

Expérience 2 : [Corde de Melde] Nombre infini de résonances mais quantification. GBF + amplificateur. Qualitatif ou quantitatif selon le timing, mais ce n'est pas une manip très transcendante de toute façon.

III) Système réel [Diapason]

Expérience 1 : BUP801 Modélisation par le passe bande second ordre (voir la formule dans le Hprépa électronique PSI/PSI*) malgré le fait que la physique soit plus compliquée notamment l'équation différentielle (ce qui est dû au fait que la résonance est très piquée, et que seul cette contribution prime proche de celle-ci). Extirper ω_0 et Q par l'ajustement de la fonction, tracer le gain en fonction de la fréquence. GBF + amplificateur + bobine avec fer doux. Prendre un GBF bleu pour être bien précis. Se placer à la résonance (elle ne sera pas forcément facile à trouver, en pratique elle est à quelques Hertz de celle attendue), elle est au 100^{ème} de Hz, tracer donc le graphe sur une plage vraiment faible. Attention doublement de fréquence car la force est en B^2 .

M32 : Couplage des oscillateurs ☆☆☆

Introduction *Expérience 0* : [Deux diapasons] couplage, dire transfert d'énergie, nécessité d'avoir deux systèmes compatibles

I) Couplage élastique

Expérience 1 : [Pendule pesant, fil de torsion] Dire même masse sinon le transfert d'énergie n'est pas optimal. Montrer modes. Faire des battements, relever la position angulaire des deux pendules. Extirper les deux pulsations. Calculer l'Em dans chacun des oscillateurs. Montrer le transfert d'énergie. Regarder la somme, évoquer les frottements par dissipation.

II) Couplage inertiel par bobine de Helmholtz *Quaranta Électricité*

Expérience 0 : Détermination du coefficient de couplage en fonction de la distance entre les bobines. Ajustement suivant la distance. En mode étalonnage.

Expérience 1 : Montage parfaitement symétrique. Pas besoin de transformateur d'isolement. On injecte dans un seul côté par wobulation, on regarde la tension aux bornes de la résistance associé. On repère l'écartement des fréquences. on les note, et on vérifie grâce à l'étalonnage du coefficient de couplage leur validité.

Expérience 2 : Wobulation, toujours, mais on envoie dans les deux circuits. On visualise aux bornes des deux résistances. On ne voit qu'une fréquence de résonance. On retourne le sens de la bobine, on trouve l'autre fréquence.

On cesse de wobbuler et on n'envoie plus que dans un seul circuit. On se place aux deux fréquences relevées plus haut. On observe soit l'accord de phase, soit l'opposition de phase entre l'entrée et la tension aux bornes de la résistance du deuxième circuit.

Expérience 3 : Réponse indicielle. On vire les résistances. On injecte du créneau à papa. On visualise aux bornes des deux bobines. Faire le lien avec la mécanique juste avant concernant les battements. Passer en XY, en rendre dingue le jury. Écarter les bobines, triper. (Prendre le 4 voies, c'est encore plus fou).

III) Chaîne d'oscillateurs couplés

Expérience 1 : [LC couplés] Woobulation (mode XY, X, rampe de woobulation, Y sortie) augmentation du nombre de résonances avec le nombre de degrés de liberté (nombre de maille en LC). Montrer cette augmentation. Fixer le nombre d'oscillateurs, calculer les fréquences de résonance, vérifier sous igor la loi dans la notice.

M33 : Régimes transitoires ☆**I) Étude et exploitation d'un régime transitoire [RLC]**

Expérience 1 : Recherche de L et C par exploitation de la réponse indicielle (décrément logarithmique, pseudo période). Varier R pour explorer les différents régimes.

Expérience 2 : Établissement d'un régime permanent forcé sinusoïdal. Portrait de phase. Single shot + train d'ondes. Synchronie.

Expérience 3 : ou [Wien] Établissement d'un régime permanent forcé sinusoïdal. Portrait de phase. Single shot. Synchronie. Attention : s'arranger pour ne pas avoir trop d'oscillations pendant le transitoire en jouant sur le filtre de Wien.

II) Diffusion

Expérience 1 : Glycérol. Peut être lancé avant le début du montage, pour être sûr que le démarrage a bien marché. Il n'y a pas grande chose à dire, il faut juste l'avoir déjà fait. Être au point sur la théorie. Cf. Notice.

III) Temps de réponse d'un capteur.

Expérience 1 : Temps de réponse de la photorésistance. DEL haute luminescence dans laquelle on envoie des pulses. Bien éclairer tout le photorécepteur. Prendre une résistance de l'ordre de 100ohm et bien se mettre dans le noir. Voir le *Sextant*. Faire ensuite le même montage avec une photodiode qui a un temps de réponse bien plus rapide et montrer que le temps d'émission du laser est bien négligeable devant celui de la photorésistance, pour être sûr que c'est bien le temps de réponse du capteur que l'on mesurait.

Expérience 2 : Réponse temporelle d'une thermistance. On met d'un coup une thermistance dans de l'eau chaude en suivant sa tension. On l'aura mise dans un circuit avec un générateur de tension et une résistance importante devant celle de la sonde, ce qui permet de faire en fait un générateur de courant, mais d'être sûr que ce n'est pas la réponse du générateur qu'on suit (habile!). En faisant l'acquisition par Synchronie, on peut voir une jolie exponentielle de quelques centaines de millisecondes de long. Mesure du temps caractéristique, le relier à $L = \sqrt{D\tau}$.

M34 : Phénomènes de transport *

Phénomènes très généraux. Diffusion, convection, radiation. Lois phénoménologiques semblables amenant aux mêmes résultats, au même formalisme. Dépendance des coefficients de diffusion avec la température.

I) Diffusion de particules

Expérience 1 : Glycérol. Peut être lancé avant le début du montage, pour être sûr que le démarrage a bien marché. Il n'y a pas grande chose à dire, il faut juste l'avoir déjà fait. Être au point sur la théorie. Cf Notice

II) Diffusion de charge

Expérience 1 : Mesure à 4 points de la conductivité du cuivre (faire avec un générateur de courant, et suivre avec deux multimètres.) *Quaranta thermodynamique* Régression linéaire sur U, I. – Loi de Matthiessen $R(T)$ de façon qualitative dans température ambiante et dans un bain eau glace. On peut essayer d'avoir cette loi plus de façon quantitative, mais cela demandera une grande précision de manipulation, de la patience, et pas mal de temps. Citer l'application à la résistance de Platine.

III) Diffusion d'énergie thermique

Expérience 1 : Mesure de la conductivité thermique du cuivre. *Notice et Quaranta thermodynamique*. Barreau globalement isolé sauf refroidi et chauffé aux extrémités. Évoquer les pertes mais elles sont difficiles à évaluer. $P_{Joule} = (L/s\lambda)\Delta T$

Comparer aux non-métaux.

Expérience 2 : Loi de Wiedemann Franz – lien avec la conductivité électrique. $\lambda/\gamma T = constante$. Connaitre sa signification physique, à savoir que l'on suppose les modèles classiques exactes, et que la conductivité électrique et thermique des métaux n'est due qu'aux électrons.

IV) Convection

Expérience 1 : Cuve eau + goutte d'encre tantôt en haut (dérive par gravité), tantôt en bas (chauffer pour voir les cellules se former). Montage : QI + condenseur + diaphragme d'ouverture + cellule + lentille (+ diaphragme de champ) +écran.

Conclusion

Autre phénomène, transport radiatif. Par les ondes EM, pas besoin de support pour se propager.

M35 : Moteurs⁴⁰

Conversion d'une énergie électrique/chimique/... en énergie mécanique, omniprésences de tels dispositifs dans notre quotidien.

I) Moteur à courant continu

Expérience 0 : Machine démonstrative, on peut mettre en évidence les collecteurs, la rotation et le principe de fonctionnement.

Expérience 1 : On va travailler à charge fixe et mesurer la commande en vitesse qui doit être proportionnelle à la tension fournie. On peut faire un ajustement linéaire et expliquer l'intérêt de ce comportement. Application à la machine à courant continu.

II) Moteur asynchrone

Expérience 1 : Faire un beau schéma et expliciter le principe de fonctionnement.

Expérience 2 : Ici, on va faire varier la charge et mesurer la puissance utile et le rendement. On peut mesurer aussi les intensités, les tensions, la fréquence de rotation. On peut montrer la loi liant le couple à l'intensité.

Expérience 3 : Rendement en fonction de la puissance utile, notion de point de fonctionnement nominal.

III) Moteur thermique

Expérience 1 : Moteur de Stirling. On va mesurer la puissance et le rendement. Ne pas oublier de peser l'éthanol en amont et de lancer le chronomètre quand on l'allume. Pour accéder aux températures, on met deux thermocouples aux points appropriés. Pour avoir la pression consulter la notice du manomètre, assez simple. Pour avoir accès au volume, chercher les extrema de la tension du potentiomètre (attention au branchement) et ensuite en déduire un volume approximatif par une loi affine, connaissant la variation de volume et le volume total. On peut tracer le cycle et accéder à la puissance fournie en faisant la fonction $\text{Print}(\text{PolygonArea}(P,V))$, vérifier la cohérence. Il faut malheureusement isoler un cycle donc supprimer les points en trop, ce qui se fait en sélectionnant les points à enlever puis à faire un clic droit.

Ne pas hésiter tout le long de l'exposé à expliciter les avantages et les inconvénients de tous ces moteurs. S'armer également de pas mal d'ordres de grandeurs concernant les belles technologies actuelles (TGV, etc.).

40. Plan proposé par Matthieu Pierce.

Leçons de Chimie

"Le jour où l'éducation nationale aura compris qu'une vraie épreuve orale de chimie ne peut être que purement théorique, la nation française aura fait un grand pas vers la connaissance."

Gandhi, 1927

"Mais ... tout ceci n'est qu'une vaste chimisterie!"

Un agrégatif

LC1 : Chimie et couleur ☆

Contenu : 1^{ère} S

Esprit : La couleur, comment la définir précisément et comment on la perçoit ? Qu'est-ce qui en chimie est cause de la couleur. Comment l'utiliser d'une part en labo et d'autre part dans l'industrie ?

I) La Couleur

Exp. : Éclairer une carotte et une solution colorée avec une QI puis avec différents filtres. D'où vient la couleur observée ?

1. Couleur spectrale et perçue

Exp. : QI + cuve avec différentes solutions (Permanganate de potassium, Diode) + fente + PVD → Spectre

*2. Synthèse additive ou soustractive**3. Couleur d'un objet***II) La matière colorée***1. Pigments et colorants*

Exp. : (Pigment) Pluie d'or *Le Maréchal – Chimie générale* et Bleu de méthylène (colorant).

2. Molécules organiques colorées

Influence du nombre de liaisons conjuguées sur la couleur (β -carotène), parler heuristiquement des niveaux d'énergie.

Il faut plus de sept liaisons conjuguées pour absorber dans le visible. Parler heuristiquement des niveaux d'énergie et de leur décalage avec le nombre de liaisons conjuguées.

3. Autres molécules colorées

Complexes ions/solvant.

III) La Couleur au Laboratoire*1. Notion d'absorbance*

Exp. : Permanganate de potassium ou diode plus ou moins concentrés.

2. Loi de Beer Lambert, dosage colorimétrique

Exp. : Étalonnage par Permanganate de potassium. Montrer que $A=f(c)$. Exp. : Application sur le Dakin. *Red-Ox Family*

3. Facteurs pouvant influencer la couleur

Exp. : [pH] Chou rouge + divers produits du quotidien (destop, antical, javel, citron)

Utilité indicateurs colorés. Signaler l'influence du solvant sur la couleur des composés.

IV) Applications industrielles*1. Synthèse*

Exp. : Synthèse de l'indigo (ne pas la faire en leçon, éventuellement en préparation) *Le Maréchal – Chimie générale* et *Hachette Première S*

Application à la teinture.

2. Extraction

Exp. : Extraction par solvant (épinard + solvant, on mélange on filtre, on récupère le solvant.) *Florilège, chercher du côté des colorants.*

LC2 : Stéréochimie ☆☆☆

Contenu : Terminale S, Première S.

Esprit : Comment représenter les molécules dans l'espace ? Lewis ok mais on a des problèmes, on va voir comment gérer ça et quelles propriétés on obtient.

I) Représentation spatiale des molécules

1. Doublets d'électrons et représentation de Lewis
2. Géométrie des molécules simples
3. Représentation de Cram

Problème pour des molécules compliquées.

Exp. : Modèle moléculaire sur C_2H_5OCl

II) Stéréoisomérisation de conformation

1. Stéréoisomérisation, conformation
2. Conformation la plus stable
3. Molécules biologiques ADN et repliement des protéines

exemple du blanc d'œuf à la cuisson

Exp. : Amylase + Amidon + acide/base → Importance de la conformation.

(Préparer quatre tubes à essai, avec de l'amidon (en pratique, demander du thiodène), 3 avec de l'amylase, un sans. Avec de la soude et de l'acide chlorhydrique, mettre les tubes à pH 7, 2 et 13. Chauffer à 37 degrés pendant 10 minutes, vérifier que l'amidon n'est détruite que dans un cas. Test au lugol (I_2 dans KI), qui devient bleu en présence d'amidon)

III) Stéréoisomérisation de configuration

1. Configuration
2. Chiralité et carbone asymétrique Énantiomérisation.

Appuyé sur modèle moléculaire.

3. Diastéréoisomérisation, Z/E et doubles carbones asymétriques

Acide maléique – Acide Fumarique

Nomenclature Z-E. Tableau récapitulatif.

IV) Propriétés des stéréoisomères

1. Propriétés physiques

Exp. : Différence de solubilité (6 vs 780 g/litre) sur acide fumarique et maléique ou banc Köffler. *Le Maréchal – Chimie organique*

Propriétés physiques des dia. différentes (tableau avec autres différences, pKa).

2. Cas des énantiomères

Exp. : Pouvoir rotatoire. On peut le monter soi-même facilement avec un laser et des polariseurs. Il faut prendre des petites cuves adaptées, comme celles du spectrophotomètre en verre.

Mélange racémique. Propriétés biologiques.

3. Détecteur et stéréoisomérisation

Exp. : Lampe UV sur Acide maléique + Eau de brome. Utiliser les tubes à essais faits pour les UV. Apparition d'acide fumarique. Filtrer sur verre fritté. Caractérisation par Köffler.

Exploitation, généralisation au rétinale et à la vision.

LC3 : Solubilité ☆*

Contenu : Première S, Terminale STI2D, STL.

Esprit : On voit que certains solides se dissolvent dans l'eau, on va expliquer et quantifier. Une fois cela fait, on va comprendre pourquoi tel solvant solubilise mieux tel soluté et quelles implications en découlent.

Introduction : Exp. : Dissolution de NaCl (357 grammes par litre) dans l'eau (d'abord un peu puis on sature), tests caractéristiques Na^+ (test de flamme) et Cl^- (nitrate d'argent) *Mesplède et Porteu de Buchère*.

I) Cohésion de la matière

1. *Solide ionique*
2. *Cristal moléculaire*

Ce ne sont pas les mêmes interactions.

3. *Électronégativité et polarisation d'une liaison*
4. *Van der Waals et liaison hydrogène.*

II) Dissolution

1. *Étapes de la mise en solution*
2. *Solubilité*

Équation de dissolution.

Définition de la solubilité.

Parler de la constante d'équilibre K_s . Équilibre solution et soluté avec le solide.

3. *Dépendance en la température*

Exp. : Pluie d'or. Attention, le faire comme c'est décrit dans le Le Maréchal n'est pas forcément adapté, le coté spectaculaire pouvant faire oublier l'intention principale. Le faire simplement avec une solution déjà préparée et des bains thermostatés est une alternative tout à fait valable.

III) Quel solvant pour quel soluté ?

1. *Caractère polaire d'un solvant. Liaisons H.*

Exp. : Baguette de verre frottée passée à côté du jet d'un robinet → l'eau est polaire. Le faire aussi avec du cyclohexane.

2. *Qui se ressemble s'assemble*

Exp. : Diode + cyclohexane/eau. *Florilège*.

3. *Groupe hydrophile, hydrophobe, solubilité d'un alcool en fonction de sa longueur*

IV) Applications

1. *Extraction liquide, liquide*

Voir un bouquin Terminale STI2D/STL qui discute largement du choix du solvant.

2. *Recristallisation*

Principe, discussions concernant les impuretés.

LC4 : Conversion d'énergie chimique ☆***

Contenu : Première S. Terminale S spécialité.

Introduction : Qu'est-ce que l'énergie ? Elle est partout et sous différentes formes. Soleil, vent, homme. Problématique : l'avoir sous une forme exploitable. Produire et transporter. Produire et exploiter sur place. Comment stocker puis libérer ? → énergie chimique !

Fil rouge : transports. Insister sur l'omniprésent compromis entre énergie récupérée et sous-produits indésirables.

I) Conversion d'énergie chimique en énergie thermique

1. Combustion

Exp. : Combustion éthanol + air. Test eau de chaux et buée.

Bien dire que c'est une réaction chimique. Parler du triangle du feu. Des différents comburants, carburants.

2. Utilisations de la combustion

Évoquer avantages, inconvénients de la combustion. Parler des voitures ou de la centrale thermique humaine et du sucre, des centrales, etc ...

3. Énergie de combustion

Tentative de quantification.

Calcul pour l'homme et le sucre. Bien noter que la combustion est une réaction chimique.

4. Énergie de réaction

Endo/exothermique (d'ailleurs la combustion est toujours exothermique et la cuisson est... endothermique!).

Exp. : Dismutation de H_2O_2 , qualitative, indiquer que ce dispositif peut permettre des mesures d'énergie. *Porteu-de Buchère* ou *Le Maréchal* pour avoir le catalyseur.

II) Conversion d'énergie chimique en énergie électrique

1. Problématique et principe.

Avantages, inconvénients.

Couples oxydoréduction.

2. Exemple de pile

Histoire (Galvani et Volta)

Exp. : Pile Daniell. Présentation. Calcul DDP.

Capacité. Durée de Vie.

3. Accumulateur

Exp.* : Charge, décharge. Réversibilité.

4. Pile à combustible

Problématique, présentation. Avantages inconvénients. Au programme de spécialité.

Conclusion : Ouvrir sur les autres types de conversion. Parler de l'airbag des explosifs, du dégagement lumineux (luminol). Insister encore sur les sous-produits.

LC5 : Séparation, purification, contrôle de pureté

Contenu : Seconde et Terminale STL, SPCL.

Voir le bouquin d'Hélène et le *Florilège*.

Introduction : Problématique. On fait des synthèses (extraction, hémisynthèse, synthèse). Produit final rarement celui que l'on veut obtenir. Dès lors, il faut séparer, contrôler et éventuellement purifier (dépend du cahier des charges).

Transparent. : Présente un topo global des étapes.

I) Séparation

1. Objectif et Définition

2. Liquide/Liquide

Exp. : Ampoule à décanter. Cyclohexane/eau. Diode → exploiter les différences physico-chimiques des espèces en question.

Aspect, température de fusion, d'ébullition, solubilité, densité, masse volumique...

Exploiter ces différences. A chacune, il y a une méthode. Température d'ébullition, distillation.

3. Solide/Liquide

Filtration/essorage, séchage à l'étuve (suivant ce qu'on veut récupérer solide ou liquide).

Exp. : On remet de l'aspirine dans son solvant puis on l'essore. *Florilège* et *Techniques expérimentales de la chimie*.

II) Contrôle de pureté

1. Objectifs, principe

Mesure de grandeur physique.

Confrontation aux valeurs tabulées.

2. CCM

Exp. : Aspirine. *Techniques expérimentales de la chimie*

3. Liquide

Réfractométrie, principe (au programme de STL,SPCL).

4. Solide

Banc Köffler

Exp. : Aspirine. *Techniques expérimentales de la chimie*

III) Purification

1. Principe général.

Retirer les impuretés.

2. Produit solide

Recristallisation. Principe.

Exp. : Faire recristalliser l'aspirine qu'on a testée. Ne pas la filtrer, présenter la CCM du produit déjà recristallisé en préparation. *Techniques expérimentales de la chimie*

3. Produit liquide

Distillation. Lavage. Séchage (avec un anhydride).

Conclusion : Optimisation des étapes.

LC6 : Matériaux polymères



Contenu : Première STI2D. Première S (un autre que le Nathan).

Polymère? On entend beaucoup parler, mais on ne sait pas vraiment ce que c'est. On va les étudier, puis voir comment on peut les synthétiser et voir quelles sont leurs propriétés physique et dans quel cas utiliser chaque polymère.

I) Présentation générale

1. Définitions

Monomère, motif, polymère. Degré de polymérisation. Masse molaire, moléculaire.

2. Quelques polymères courants.

Exp. : Se procurer différents types de polymères. Naturels, artificiels.

3. Structure des polymères

Interactions. Covalente, liaison H, VdW.

Structures linéaire, réticulée.

Exp. : Synthèse du Slim. 1ère STI2D Nathan

II) Synthèse de polymères

1. Différents types de polymérisation

Polyaddition, polycondensation.

2. Exemple

Exp. : Nylon. Protocole de *Chimie expérimentale* – 2. *Chimie organique et minérale*. Bien introduire doucement la seconde phase. Soulever une petite zone de nylon avec une pince à épiler et enrouler le fil qui vient avec une baguette.

Histoire du nylon (1937 + obsolescence programmée)

III) Propriétés physiques

1. Propriétés thermiques

Exp. : Élastique + azote liquide → Température de transition vitreuse → Polymères thermoplastiques.

Et aussi thermodurcissables.

2. Propriétés mécaniques

Amorphe, semi-cristallin. (Déformable, cassant.)

3. Propriétés absorbantes

Pouvoir absorbant.

Exp.* : Agent absorbant, poudre pour couche bébé.

4. A chaque utilisation son polymère

Tableau récapitulatif du livre de 1ère STI2D.

Conclusion : Ouverture sur les nanotechnologies. Machine microscopique. "Cellules artificielles". Enjeux et dangers.

Agir : Activité sur le nylon et son développement dans un domaine concernant les loisirs comme la pêche (recherches sur l'élasticité, la transparence, la mémoire, etc.)

LC7 : Chimie et développement durable



Contenu : Terminale S, Terminale STI2D STL.

Bibliographie : Chimie verte, chimie durable – Antoniotti.

Esprit : Lien entre chimie et développement durable. On va déjà comprendre le concept puis voir comment on peut l'appliquer pour toutes les réactions chimiques. Ensuite on va voir qu'avoir un regard critique sur les ressources dans le cadre de la *green chimie* peut faire avancer les choses.

Introduction : Impact indéniable de l'industrie sur l'environnement. Pas seulement à cause des gaz à effet de serre. Lorsque l'on récupère un produit, ne serait-ce qu'un emballage plastique, il faut se dire que de nombreux sous-produits plus ou moins gênants ont été générés. Ces sous-produits sont parfois très dangereux. Questions : qu'en faire ? comment les limiter ? Développement du concept de Chimie Verte ! Chimie en accord avec le développement durable.

I) La Chimie Verte

1. Le développement durable

Répondre aux besoins de la génération présente sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Dessin du triple cercle : économie, équité, écologie.

2. Charte de la Chimie Verte

12 principes de la chimie verte.

Plus propre, plus sûre, plus durable.

II) Une chimie plus responsable

1. Concept de l'économie d'atome.

Synthèse vs hémisynthèse.

Transparent : exemple sur la synthèse de l'ibuprofène.

2. Choix du solvant

Utilisation du dioxyde de carbone supercritique. (Voir Terminale STI2D/STL édition CASTELLIA qui fait un topo complet sur le dioxyde de carbone supercritique.)

Exp. : Synthèse sans solvant. (Aldolisation croisée, *40 expériences illustrées Martinaud*, expérience 21).

Faire CCM pour caractériser : réactif 1, réactif 2, produit solide dissous dans l'éluant, les trois ensemble.

Bien diluer ces 4 préparations !

3. Économie d'énergie.

Exp. : Synthèse au micro-onde de l'ester de poire *Florilège*

III) Un regard neuf sur les ressources.

1. Utilisation des agro-ressources

2. Valorisation des sous-produits

Utilisation du dioxyde de carbone produit dans les combustions.

3. Recyclage

Électrolyse pour traiter les solvants.

Agir : Dossier sur la catastrophe de Bhopal (caractère indispensable du produit synthétisé (pesticide) pour la révolution agricole et le bien-être de la population indienne, déroulement de la catastrophe, responsabilité humaine, conflit intérêts financiers/sanitaires, leçons tirées de la catastrophe (utilisation directe des réactifs dangereux sans stockage)). Faire sentir que la science est source de danger mais qu'elle peut les résoudre par sa nature créatrice. Prendre temps, rester lucide. Occasion pour parler des sigles de sécurité.

LC8 : Synthèses inorganiques



Bibliographie : Tout-en-un Chimie MPSI-PTSI, Dunod. BUP 765 « Un complexe facile à préparer ». Stryer, Biochimie. Clayden, Chimie Organique.
Niveau : Terminale STL SPCL.

Introduction : Donner comme exemple de synthèse inorganique celle d'un complexe, analyser ce complexe et donner l'intérêt de ce type de composés.

Il faut définir clairement le cadre en disant que l'on s'intéresse à un cas particulier de synthèse inorganique que l'on peut réaliser au laboratoire, celui des complexes. On commence donc par introduire ce que sont les complexes.

I) Complexe

1. Définition

Ligand. Ion central. Nomenclature. Exemple de quelques complexes.

Exp. : couleurs des complexes. *Porteu-de-Buchère*. Le faire en tube à essais et indiquer les réactions sur transparents.

Exp. bis : Cu_2^+ dans solvants différents. Couleurs différentes mais aussi et surtout des complexes différents. *Le Maréchal, Complexes du cuivre p 99*

2. *Réaction de formation d'un complexe.* Écrire exemple de réaction. Constante de formation globale. Parler de l'effet chélate favorisant la stabilité des complexes impliquant des ligands polydentates.

II) Synthèse d'un complexe

1. Principe

Écrire la réaction. Lister les différentes étapes de la synthèse, donner le protocole. Faire un tableau d'avancement. « Maintenant on va calculer quel est le réactif limitant ». (c'est le chlorure de nickel). Calculer les quantités en jeu.

Exp. : Faire la première étape de synthèse devant le jury.

Remarque et ce n'est pas dit dans le BUP : on met un excès d'ammoniaque pour déplacer l'équilibre dans le sens direct, le complexe n'est pas thermodynamiquement stable dans l'eau.

2. Purification

Expliquer le principe à partir d'un schéma.

Exp. : Prendre le produit déjà synthétisé en préparation, expliquer l'étape de filtrage et de lavage puis recueillir le produit dans une boîte de Pétri.

Remarque : on lave à l'alcool pour enlever l'eau et l'ammoniaque, puis à l'éther pour enlever l'alcool, et l'éther s'évapore vite tout seul!

Transition : Comme après toute synthèse le chimiste doit analyser le produit obtenu, ce qui est aussi utile lorsque l'on doit distinguer plusieurs complexes différents.

III) Caractérisation et rendement

1. Spectrophotométrie UV

Dire que l'on choisit la spectrophotométrie car on connaît le spectre d'absorption de ce ce complexe.

Exp. : Effectuer le spectre devant le jury en utilisant des cuves à spectro déjà prêtes (attention il faut utiliser du verres car les solvants orga dissolvent le plastique!!). Interpréter le spectre.

2. Calcul de rendement

Maintenant que l'on sait que le complexe a été synthétisé, on va calculer le rendement.

3. Remarques sur le protocole

Faire le bilan concernant : sécurité, énergie, sous-produits, matière première.

IV) Intérêt des complexes

1. Un 'bon' catalyseur

Expliquer pourquoi les complexes sont en général de bons catalyseurs. Cela vient du rapprochement géométriquement déterminé des ligands lors de l'établissement d'un complexe.

2. Une réaction Nobélisée

Montrer une réaction catalysée par un complexe (par exemple celle de Heck avec du Palladium). Insister sur l'importance de la catalyse par complexes métalliques de nos jours.

3. Un exemple en biologie

Expliquer le rôle crucial de l'hémoglobine dans la respiration, et bien insister sur le fait que son action n'est possible que parce que c'est un complexe. (Le ligand O₂ se lie ou se délie selon le degré d'oxydation du cation métallique). Montrer la molécule d'hémoglobine sur transparent.

V*) Autre synthèse inorganique

Donner l'exemple de la synthèse de l'ammoniac, esquisser de façon simple les contraintes et les stratégies adoptés par les industriels. Préciser l'importance des synthèses inorganiques de nos jours.

Conclusion : On a vu comment synthétiser et analyser des molécules inorganiques en prenant l'exemple des complexes. Cet exemple est important car bien qu'inorganiques, les complexes interviennent dans les organismes vivants. D'autre part ils sont de bons catalyseurs ce qui les rend particulièrement attrayant, en particulier dans le domaine industriel au sein duquel le facteur temps est déterminant dans le choix d'un processus de synthèse.

LC9 : Stratégie en synthèses organiques ☆

Contenu : Terminale S

Insister sur le comportement durant les expériences.

I) Synthèse organique – Suivre le *Nathan Terminale S**1. Définition*

Fabriquer une molécule puis l'isoler.

2. Protocole typique

Mise en œuvre et réaction chimique.

Extraction et récupération de l'espèce chimique synthétisée.

Analyse de l'espèce chimique synthétisée.

Purification de l'espèce chimique synthétisée.

Transparent : présentation du premier protocole. Identifier chaque étape.

3. Paramètres expérimentaux

Réactions/ réactifs.

Agitation, température, durée de réaction, solvants, pH, catalyseurs.

II) Analyse du protocole – Suivre le *Nathan*

On discute ici chacune des étapes de la synthèse de l'aspirine.

Montrer le montage même si les expériences n'ont pas été faites.

*1. Espèces chimiques mises en jeu**2. Étapes de transformation*

Choix du solvant.

Exp. Acide salicylique dans anhydride et cyclohexane ou Sel dans eau ou cyclo.

Choix de la température.

Exp. : Cinétique du *Mesplède*. Manipulation 79. L'effectuer en double avec des réactifs qui étaient initialement dans de la glace et de l'eau chaude. L'avancement de la réaction se voit à l'œil et les temps de réactions sont vraiment très différents.

3. Étapes de traitement

Exp. : Solubilité de l'aspirine dans l'eau en fonction de la température.

4. Identification et purification

Exp. : CCM de l'aspirine.

III) Comparaison de protocole*1. Critères*

Rendement, coût des produits.

Autres critères : chimie verte, cahier des charges, sécurité, etc.

2. Synthèses de l'éthanoate de butyle

LC10 : Dosage par étalonnage ☆☆☆

Contenu : Terminale S.

Bibliographie : Tout-en-Un PCSI (cinétique macroscopique) et Nathan Terminale S.

Introduction : Contrôle qualité. Aliments/médicaments.

I) Concept du dosage par étalonnage*1. Définitions*

Dosage (connaître la concentration). Dosage par étalonnage : mesure rapide, physique donc sans destruction. Différence avec titrage.

2. Utilité et application

Contrôle de qualité.

3. Première approche

Exp. : Fioles avec différentes concentrations de permanganate de potassium. Prendre un tube dont on ne connaît pas la concentration et le situer pour estimer celle-ci.

Mais Khhhévin se plaint : "É haut, c'est pas assez quantitatif!" Réponse : spoil pas bâtard!!!

II) Absorbance, dosage pas spectrophotométrie*1. Absorbance d'une solution, Loi de Beer Lambert*

Exp. : Réaliser les spectres d'absorbance pour plusieurs composés colorés.

Importance de la longueur d'onde. Choix de celle-ci.

Définition absorbance.

*2. Solutions étalons**3. Application*

Exp. : Dosage d'un antiseptique, le Dakin.

Transition : que faire si les solutions sont incolores.

III) Généralisation*1. Démarche expérimentale*

- Choix d'une observable physique

A priori dès qu'une grandeur physique est accessible et permet de remonter aux concentrations : spectrométrie, conductimétrie, volumétrie, manométrie, pouvoir rotatoire, réfractométrie, densité etc.

- Solutions étalons. Points expérimentaux, courbe de modélisation, incertitudes. On veut une relation LI-NÉAIRE.

- Mesure de la grandeur.

2. Dosage par conductimétrie

Conductivité d'une solution

Loi de Kohlrausch, analogie avec BL

Exp. : Cellule conductimétrique + eau distillée + sérum physiologique. *Mesplède*.

LC11 : Dosage par titrage

Introduction : Nécessité et omniprésence des dosages pour des contrôles qualité. Analyses médicales, taux de pollution, contrôle alimentaire, etc. On a vu lors d'un précédent chapitre les dosages par étalonnage qui ne demandaient pas de détruire l'échantillon analysé mais nécessitaient des quantités références. L'on voit ici un autre type de dosage.

I) Principe général des dosages par titrage

Préciser au début que l'on veut titrer le degré d'acidité du vinaigre. On effectuera ce titrage en parallèle de la partie I), sur un mode démarche d'investigation.

1. Réaction support d'un titrage

Titration DIRECT. Espère titrante, titrée.

Caractère quantitatif de la réaction de titrage. (+ exclusive et immédiate)

2. Équivalence d'un titrage

Définition. Proportions stœchiométriques, changement de réactif limitant.

3. Dispositif expérimental

Burette graduée. Solution titrante, solution à titrer, barreau aimanté.

Préparation des solutions, que dois-je connaître avec précision, qu'est-ce qui importe peu? etc.

5. Récapitulatif

II) Repérage de l'équivalence

1. Plusieurs méthodes

Indicateur coloré comme dans l'expérience précédente.

Mais si c'est impossible par suivi d'une grandeur physique.

2. Conductimétrie

Loi de Kohlrausch. Explication des pentes. Équivalence.

Exp. : Même dosage.

3. pHmétrie⁴¹

Exp. : Même dosage.

4. Récapitulatif

Quelles techniques pour quelles réactions de titrages?

Blablabla

Et si rien ne marche?

5. Dosage indirect

41. quand on n'a pas d'éthique scientifique.

LC12 : Optimisation des cinétiques de réaction ☆☆☆

Contenu : Terminale S.

Exp. introductive : Mesplède 79 dans un bécher. On suivra cette réaction toute la leçon.

I) Évolution cinétique d'une réaction*1. Présentation*

Réactions lentes, rapides, on regarde l'évolution de l'avancement dans le temps.

Temps de demie-réaction.

2. Moyen de suivi d'une réaction

Trempe + dosage ou suivi dans le temps.

Pour les synthèses organiques, il y a la CCM. Exp. : Iode + sulfate par spectrophotométrie. Mesplède p 99

3. Intérêt industriel de la maîtrise de la cinétique

Accélérer c'est intuitif, mais ralentir aussi (conserver les aliments).

II) Facteurs influençant la cinétique*1. Concentration*

On montre une autre courbe faite en préparation avec une concentration différente.

Exp. : Multiplier par 2 les deux concentrations.

2. Température

Exp. : L'effectuer en double avec des réactifs qui étaient initialement dans de la glace et de l'eau chaude.

L'avancement de la réaction se voit à l'œil et les temps de réactions sont vraiment très différents.

3. Solvant

On en parle en passant. Mais attention, certains solvants sont toxiques.

III) Catalyse*1. Présentation*

Homogène, hétérogène, enzymatique.

Dire que le catalyseur est toujours régénéré.

Exp. : Eau oxygénée dans 5 tubes à essai + eau (témoin), navet (catalase) + Pt + Fe(III). Mettre enfin un tube avec du Fe(III) de même concentration mais seulement avec de l'eau. On est alors sûr de la régénération du catalyseur. Tada !! Voir livre de lycée au chapitre catalyse.

Exp. : Mentos + coca ! Le mentos n'est pas attaqué. Illustration de la surface de catalyse.

2. Intérêts des catalyseurs en industrie

Comparaison des catalyses homogène et hétérogène (récupération post réaction)

3. ...et en biologie

Conditions très spécifiques (pH et température). Grande spécificité des catalyseurs enzymatiques. Très grande efficacité. Énorme domaine de recherche.

LC13 : Synthèse organique : caractérisation par spectroscopie *

Bibliographie : Nathan Terminale S

Molécule = formule brute (spectrométrie de masse) + fonctions + organisation. Démarche en mode puzzle.

Réactifs, intermédiaires, produits. Pour savoir si l'on doit purifier ou non.

NB : Bien différencier synthèse industrielle et synthèse de recherche. Ne pas donner plus d'informations sur la RMN et l'IR que ce qu'il y a dans les livres de lycée.

I) Synthèses organiques

1. Objectifs

Point de vue des organiciens. Lors d'une synthèse, on maîtrise plus ou moins les espèces présentes.

Si l'on veut s'assurer que la synthèse a atteint son terme, il faut vérifier que la seule espèce présente en solution est celle recherchée et qu'il ne reste ni réactifs ni produits intermédiaires.

Si l'on fait une synthèse d'investigation et que l'on en sait pas véritablement quels seront les produits, il faut pouvoir les identifier.

2. Démarche

Résoudre un puzzle (le puzzle terminé est l'identification des toutes les espèces dans le brut réactionnel). D'où part-on ? Soit l'on a une idée des molécules à identifier car on les sait proches des molécules qui ont réagi. Exemple de la synthèse de l'aspirine, entre acides salicylique et acétylsalicylique seules quelques fonctions sont connues. Le puzzle est déjà bien cerné.

Soit l'on n'a aucune idée de ce qu'il y a dans le brut réactionnel. Première étape sera d'obtenir la formule brut des composés. (Spectroscopie de masse)

3. Caractérisations

Caractéristiques physiques tabulées. Exemples.

Mais ici on va caractériser par spectroscopie.

L'objectif est ici d'étudier de potentielles "nouvelles" molécules. L'on voudra leur intimité, leur structure dévoilée.

II) Caractérisation par spectroscopie : UV, visible

1. Principe, champ d'action

S'applique lorsque le produit à identifier à une couleur.

Domaine optique. Adapté aux colorants alimentaires.

Molécules absorbantes (1-7 liaisons doubles conjuguées, UV. + de 7, dans le visible. Noyaux aromatiques.)

2. Grandeurs servant à la caractérisation

Spectre UV visible. Longueur d'onde de maximum d'absorption. Point isobestique pour un indicateur coloré.

Exp. : Synthèse de l'indigo. *Le Maréchal* – 2. *La Chimie expérimentale. Chimie organique et minérale*

Faire son spectre (cuve à chromatographie en quartz). Le caractériser.

Transition : Ok. On l'a bien identifié. Mais on a pas vraiment d'indice sur sa structure.

III) Caractérisation par spectroscopie IR

Cadre : Lors d'une synthèse d'un composé, l'on voudrait être au courant des espèces présentes dans le milieu réactionnel. Ces espèces sont incolores. On ne part pas de rien, on a une idée des groupes fonctionnels mis en jeu de par la connaissance du mécanisme se déroulant.

1. Principe de la spectroscopie infrarouge

Déformation élongation. Mettre en exergue l'analogie harmonique.

L'idée est d'identifier des groupements à l'**intérieur** de la molécule.

Montrer les déformations/élongations/vibrations à l'aide du logiciel.

2. Spectre des fonctions principales

Projection de spectre de molécules simples.

3. *Exploitation d'un spectre IR*

Plus compliqué. Démarche face au spectre. Tableau des références, empreinte digitale.

Exp. : Spectre IR des espèces jouant un rôle dans la synthèse de l'aspirine. Logiciel Specamp.

Conclusion : Application à la synthèse de l'aspirine. Le spectre IR du brut réactionnel (somme pondérée du spectre IR des différentes espèces) va voir certains groupements disparaître dès lors que la synthèse sera terminée.

IV)* Résonance magnétique nucléaire

Et l'aspirine? Quelle forme a-t-elle? Le spectre IR a donné des informations sur les groupements. Mais comment les arranger?

1. *Principe, objectifs*

Idée : arranger les groupements.

2. *Spectre RMN*

Lecture d'un spectre. Intégration, déplacement chimique, multiplets. Interprétation.

Exemple simple sur 1,1 éthanol. Spectre par Specamp. On décortique.

Conclusion : Et les molécules plus compliquées encore? En biologie notamment?

LC14 : Relation structure réactivité en chimie organique

Contenu : Terminale S

Esprit : Des réactions ont lieu et sont dues à des groupes fonctionnels qui sont une très bonne manière de décrire et prédire la réaction. Mais cette réactivité elle-même peut s'expliquer au niveau microscopique.

Exp. introductive : Dibrome + cyclohexène/cyclohexane.

Qu'est-ce qui fait que l'un a réagi tandis que l'autre non ?

On va devoir classer, identifier les groupes dans la molécule qui réagissent.

I) Groupes fonctionnels et réactions chimiques*1. Groupes fonctionnels*

Présentation des groupes fonctionnels les plus courants.

Brève nomenclature (mais rester sur du mono fonctionnel)

2. Types de réactions chimiques

Modification de chaîne/groupe caractéristique

L'un l'autre ou même les deux à la fois.

Retour sur la réaction introductive, l'écrire et montrer que c'est un changement de groupe caractéristique.

Parler du craquage du pétrole pour la modification de chaîne.

3. Catégorie de réactions

Élimination. Exp. : Déshydratation d'un alcool. *JFLM Chimie expérimentale. 2. Chimie organique et minérale. p65*

Addition. Exp. : Test à l'eau de brome (qui doit se décolorer) en contact avec le produit de la déshydratation. Possibilité aussi de regarder l'indice de réfractométrie de l'alcène.

Substitution. Exp. : Test de Lucas. -OH devient -Cl. *JFLM Chimie expérimentale. 2. Chimie organique et minérale. p56 ou Mesplède orga.*

II) Électronégativité et polarisation*1. Électronégativité*

Concept. Et prévision par le tableau périodique

2. Polarisation d'une liaison

Liaisons covalentes polarisées, non polarisées. Liaisons ioniques.

Exp. : Baguette eau/cyclohexane.

3. Application aux différents groupes fonctionnels

Citer les réactifs de Grignard.

III) Interprétation de la réactivité*1. Sites donneurs, accepteurs**2. Mouvement d'électrons*

Pas toujours un doublet non liant, citer un exemple d'un procédé radicalaire.

3. Exemples

Retour sur les réactions.

Conclusion : Ouverture sur les autres réactions "élémentaires". Oxydation, réduction.

LC15 : Réaction chimique par échange de proton

Contenu : Terminale S.

Acidité ok, on en a une idée. Basicité, un peu moins. Retenir que historiquement, alcalin ça veut dire basique.

I) Acidité et basicité*1. Quantification de l'acidité : le pH*

la concentration en proton.

Exp. : Papier pH sur Coca, vomit, cyprine, citron, destop, eau.

2. Produit ionique de l'eau

En fait dans l'eau il y a des oxoniums et des hydroxydes.

3. Solution acide basique ou neutre.

"C'est très bien tout ça mais cela ne nous dit pas qui ou quoi va réagir avec qui ou quoi ni comment ?"
Apprends à parler français, Khhhévin.

II) Couple acide base*1. Acide et base*

Définition acide conjugué, base conjuguée et couple. (Brønsted)

Exemples. Notamment l'eau qui est ampholyte.

*2. Réactions acido-basiques**3. Acides fort, faible. Bases forte, faible.*

Notion de dissociation.

III) Réactivité des bases et acides forts*1. pH d'une solution d'acide fort ou base forte dans l'eau*

Exp. : Base solide dans l'eau. Pastille de soude.

2. Réaction d'un acide fort avec une base forte

Quasi totale, exothermique. Rappel règle de sécurité.

3. Application de ces réactions

Dosage par titrage.

IV) Réactivité des acides faibles*1. pKa, notion d'équilibre*

Introduire la constante d'équilibre ici.

Exp. : Détermination du pKa de l'acide acétique. Introduire de l'éthanoate de sodium solide.

Comparaison des constantes d'acidité.

2. Domaine de prédominance

Exp. : Application aux indicateurs colorés (BBT)

Application aux acides aminés.

3. Importance du contrôle de pH, solution tampon.

Exp. : Créer une solution tampon par titrage à la demie-équivalence. Ajouter acide, base, eau montrer que le pH ne change pas. Florilège

LC16 : Capteurs électrochimiques ☆*

Contenu : Terminale STL SPCL.

Exp. introductif : Pile Daniell (Cu/Zn). Avec deux concentrations différentes pour l'une demie-pile.
→ Indication sur la concentration à partir de la ddp. → Capteur. (On remarque d'ailleurs qu'il faut une électrode de référence.)

I) Potentiel d'électrode

1. L'électrode

Définition : système constitué d'au moins deux phases dont l'un est solide et l'autre électrolytique pouvant être le siège d'un transfert de charge à l'interface séparant les deux phases. → Demie-pile.

2. Potentiel d'électrode

Nécessité de choisir une électrode de référence. ESH, présentation. On en profite pour parler du couple H^+/H_2 pour faire la transition sur le rôle de l'oxydoréduction.

3. Loi de Nernst

Potentiel d'électrode = potentiel d'oxydoréduction.

Exp. Vérification de cette loi sur la pile Daniell

Transition : On veut se servir de ces résultats pour fabriquer des capteurs électrochimiques. Mais c'est impossible de toujours utiliser un pont salin et une solution d'ions zinc. Il faut donc fabriquer des électrodes de référence pratiques et polyvalentes.

II) Électrode de référence

Potentiel fixe.

1. Électrode au calomel saturé

Description. Bien insister sur le fait que c'est une demie-pile autonome.

2. Pourquoi c'est bel et bien une électrode de référence ?

Évoquer le caractère fixe du potentiel par la saturation du KCl. Attention, une explication complète est hors programme.

3. Autre électrode

Sulfate mercurieux. Évoquer son intérêt.

III) Dosage potentiométrique

1. Électrode composée d'un des membres du couple

Exp. : Dosage de Cu^{2+} . Électrodes : ECS et cuivre. Première étape avec une solution de concentration connue, on détermine E° du couple cuivre (on précise que l'on pourrait le prendre dans une table mais que cette valeur dépend de la température, avec cette méthode on est certain de bien prendre le bon E°). Deuxième étape : solution de concentration inconnue, on remonte à la concentration par la formule de Nernst.

Mais problème si l'on s'intéresse à un couple comme Fe(III)/Fe(II) où il est impossible d'avoir une électrode formée par l'un des membres du couple.

2. Électrode n'appartenant pas au couple

Utilisation d'une électrode en Argent ou en Platine.

Exp. : On connaît la concentration totale en Fer, on va estimer le rapport pour remonter à la concentration des deux ions. Montrer que le E° dépend de l'électrode.

3. Sonde lambda

Capteur destiné à mesurer le taux de dioxygène d'un gaz.

La sonde lambda est généralement placée sur le pot d'échappement entre le collecteur d'échappement et le pot catalytique. Ses mesures donnent la possibilité au calculateur d'injection de déterminer la proportion du mélange air-carburant pour laquelle l'efficacité du moteur sera optimale.

Référence : Terminale STI2D STL. Nathan.

LC17 : Molécules de la santé

Contenu : Seconde. Première ST2S.

I) Les Médicaments*1. Présentation générale*

Objectif. Le médicament que l'on consomme. Forme galénique : forme sous laquelle le médicament est présenté. Solution buvable, injectable, etc.

2. Formulation, principe actif et excipient

Le médicament est un mélange. Définition des trois termes.

Exp. : CCM sur plusieurs formulations de l'aspirine (principe actif toujours là, l'excipient non). Aspirine/Aspégic.

Médicament générique.

3. Médicament et milieu biologique

Grande variété des milieux biologiques. Tout le long du tube digestif, grande variété de pH, de solvants.

La formulation permet de libérer les principes actifs là où c'est souhaité.

Exp. : Amylase salivaire (Préparer quatre tubes à essai, avec de l'amidon (en pratique, demander du thiodène), 3 avec de l'amylase, un sans. Avec de la soude et de l'acide chlorhydrique, mettre les tubes à pH 7, 2 et 13. Chauffer à 37 degrés pendant 10 minutes, vérifier que l'amidon n'est détruite que dans un cas. Test au lugol (I_2 dans KI), qui devient bleu en présence d'amidon). Variation de son efficacité avec le pH. Expérience de principe en considérant que l'excipient c'est l'amidon.

Exp. : Ou les gélules qui se dissolvent suivant le pH.

II) Obtention de principes actifs

Synthèse, hémisynthèse, extraction

Description de chaque procédé.

Synthèse : Paracétamol.

Hémisynthèse : Aspirine à partir de la salicyline du saule.

Différences entre produits naturels et produits synthétiques.

Exp.* : Extraction de l'anéthol de l'anis étoilé. *Mesplède*

III) Antiseptiques et désinfectants*1. Définitions*

Différences entre les deux. Exemples courants.

2. Caractère oxydant des antiseptiques

Définir ici rapidement les réactions d'oxydo-réduction.

l'oxydation détruit les organismes vivants. Rapide remarque sur les molécules anti-âge qui sont des anti-oxydants.

Exp. : Montrer le caractère oxydant d'un antiseptique. Laine de fer + bétadine. Empois d'amidon. Test cation métallique (open). *Livre de lycée*

3. Principes actifs des antiseptiques et désinfectants usuels

LC18 : Structures et propriétés des molécules du vivant *

Contenu : Première et Terminale ST2S

I) Molécules du vivant

1. La molécule d'aspartame

Présentation : Formule, nom des groupes fonctionnels. Édulcorant.

Exp. : Hydrolyse de l'aspartame, BUP 847. Mettre 4 dosettes au lieu de 2. Bain Marie plutôt que chauffe-ballon.

2. Les briques du vivant : les acides aminés

Exp. : Test sur CCM (ninhydrine, attention à faire sous la hotte) sur le produit de l'hydrolyse. Bien diluer les composés auxquels on comparera le brut réactionnel.

Formule générale. Exemples sur les plus importants.

3. Autres molécules importantes

Exp. : Caractérisation de la liaison peptidique dans la caséine du lait (prendre lait entier). Mesplède. Organique Oses : polyalcools pourvus d'une fonction aldéhyde ou cétone.

Acides gras : Longue chaîne carbonée et acide carboxylique.

II) Structure des molécules du vivant

1. Conformation

Définition. Les molécules sont en général très longues. Suite d'acides aminés.

Il y a seulement quelques conformations stables. Elles dépendent du milieu biologique.

Il existe des logiciels puissants qui permettent aux biologistes de trouver ces conformations stables.

2. Molécule amphiphile

Définition : possédant à la fois des groupes hydrophobes et hydrophiles.

Exemples.

Compétition entre interaction inter et intramoléculaire.

Dessin de la molécule enroulée en hélice.

Exemple : membranes biologiques des cellules. Liposome.

3. Configuration

Carbone asymétrique et chiralité des acides α -aminés.

Énantiomères, diastéréoisomères.

Représentation de Fischer.

4. Chiralité et formalisme clé serrure.

Grande différence d'effet entre deux énantiomères.

Exemples et explication par le formalisme clé serrure.

Exp. : Odeur du limonène.

III) Le Milieu Biologique

Il est extrêmement varié. pH, solvant, température, etc...

Ces variations vont influencer la forme des molécules et donc leurs propriétés.

1. Influence de la température sur la conformation

Exp. : La cuisson de l'œuf

Faible température, aucune congrégation des groupements hydrofuges. Hausse de la température, plus de liberté dans la conformation, agrégation des parties hydrofuges. Coagulation ou solidification.

2. Influence du pH sur la conformation

Exp. : Amylase salivaire (Préparer quatre tubes à essai, avec de l'amidon (en pratique, demander du thiodène), 3 avec de l'amylase, un sans. Avec de la soude et de l'acide chlorhydrique, mettre les tubes à pH 7, 2 et 13. Chauffer à 37 degrés pendant 10 minutes, vérifier que l'amidon n'est détruite que dans un cas. Test au lugol (I_2 dans KI), qui devient bleu en présence d'amidon).

Activation désactivation de fonction selon le pH et donc la conformation.

2.bis. Influence de P_{O_2} sur la conformation de l'hémoglobine

3. Protection déprotection d'une fonction.

Il faut éviter au suc pancréatique de digérer le pancréas !

Production d'une longue molécule inactive. Puis hydrolyse de celle-ci là où elle est nécessaire par une enzyme.

LC19 : Solvants (CPGE) ☆☆☆

Bibliographie : Nouveau programme de MPSI.
Prérequis : Lewis. Électronégativité.

I) Le Solvant*1. Définition*

Tout liquide peut tenir le rôle de solvant. L'idée sous-jacente est véritablement d'y mettre quelque chose et que ce quelque chose y soit réparti de façon homogène afin qu'il se tienne des réactions en son sein. Rôle d'"entremetteur", mettre en contact !

Exemples classiques de solvants : eau, cyclohexane, dichlorométhane, éthanol...

2. But d'un solvant

Mettre deux ou plusieurs espèces chimiques dans une phase homogène pour qu'elles réagissent efficacement.
Exp. : Diode dans l'eau, dans le cyclohexane.

Le solvant est d'autant meilleur qu'il solubilise une espèce chimique.

On veut des "concentrations" les plus élevées possibles.

3. Quantification mathématique

Solubilité.

Exp. : Sel dans l'eau, le cyclohexane. Calcul des deux solubilités.

Transition : On aimerait maintenant avoir une idée des raisonnements à tenir pour utiliser les divers solvants à notre disposition.

II) Forces intermoléculaires (à faire rapidement)

Bien donner des OdG et comparer à kT.

*1. Définition**2. Interactions engageant un ion**3. Interaction de VdW**4. Liaisons hydrogène***III) Dissolution***1. Propriétés d'un solvant*

Permittivité relative. Polarité. Caractère protique.

Exp. : Baguette et électricité statique avec l'eau et le cyclohexane.

2. Dissolution d'un cristal ionique dans l'eau

Dissolution, explication, puis explication microscopique.

3. Choix du solvant

Exp. : Différence de solubilité de l'acide maléique et fumarique.

Qui se ressemble s'assemble. Faire des exemples.

IV) Applications*1. Extraction liquide/liquide*

Coefficient de partage.

Exp. : Diode dans l'eau, le faire passer dans le cyclohexane.

2. Effet du solvant sur la cinétique*

Exp. : Hydrolyse du chlorure de tertibutyle. Mixe entre *Florilège* et *Porteu-de-Buchère*. Stabilisation de l'intermédiaire réactionnel Hammond.

Conclusion : Ouvrir sur le choix du solvant. Liquides ioniques (ils ne peuvent pas s'évaporer!), synthèse sans solvant, CO₂ supercritique.

Agir : CO₂ supercritique utilisé aujourd'hui pour décaféination. Tantôt c'était le dichlorométhane. De nombreuses intoxications.

LC20 : Classification périodique (CPGE)



Prérequis : Règles n,l,p. Hund, Klechkowski.

I) Tableau de Mendeleiev

1. Approche historique

Historiquement, périodicité des propriétés chimiques.

Exp. : KCl, KBr, KI avec AgNO_3 qui réagissent de la même manière. *Tout-en-Un*

Citer Li, Na, K et Be, Mg, Ca.

Remarque sympathique : Jusque dans les années 40, on était persuadé que la radioactivité avait des effets bénéfiques sur la santé. En particulier le Radium. Il y avait notamment de la peinture au Radium qui avait la particularité de briller dans l'obscurité. Les jeunes filles qui travaillaient dans les usines où était utilisée cette peinture s'en mettaient sur les ongles et les paupières comme produit de beauté. Question : de quelle maladie sont-elles mortes très rapidement ? Un indice c'est un cancer ! Mais lequel ? Il suffit de regarder plus haut et... on voit que le Radium est dans la même colonne que le Calcium (qui constitue les os). Le radium se substitue au calcium et irradie ensuite son environnement. Les demoiselles sont donc mortes de cancers osseux !

2. Construction par le numéro atomique

On les classe par numéro atomique et on fait ressortir dans la même colonne les composés ayant les mêmes réactivités chimiques. Lignes = périodes. Colonnes = familles.

Nommer les noms des familles. On parle des gaz rares (découverts en dernier car ils n'ont aucune réactivité, He détecté par sa raie dans la chromosphère du soleil en 1868.)

3. Configuration électronique

Ligne, colonne, bloc.

Les éléments d'une même colonne ont la même structure externe (électrons de valence).

Éléments de transition. Lanthanides, actinides. Définition des métaux. Conduction, malléabilité, ductibilité, oxydes métalliques. Résistivité qui augmente avec la température.

4. Préviation des ions

Gaz rare le plus proche, ou sous-couche remplie.

Transition : On a le tableau rempli, on va maintenant s'intéresser aux propriétés des atomes et voir leur évolution au sein du tableau.

II) Évolution des propriétés atomiques

1. Énergie d'ionisation

Définition. Évolution dans le tableau. Pouvoir réducteur. Gaz rares, alcalins, alcalino-terreux, métaux.

Exp. : Manip de Na, K.

2. Affinité électronique

Définition, évolution. Pouvoir oxydant.

Exp. : Poudre d'aluminium et diiode ou diiode et thiosulfate.

3. Électronégativité

Définitions. Fluor versus Césium. Utilité prévision de la polarisation des liaisons.

Exp. : *Expérience de la famille rédox, p146* Quelques expériences sur la stabilité des halogènes et halogénures.

III) Similarité et évolution des propriétés au sein d'un même famille

1. Bloc s

Perd 1 ou 2 électron pour avoir cation métallique, forte réactivité chimique.

Réduction avec l'eau violente. Oxydes très basiques. Mais le béryllium est amphotère.

Exp. : Combustion Magnésium fait virer de couleur un indicateur basique. Attention mettre des lunettes UV. *Cachau REDOX ou Tout-en-Un*

2*. Métaux bloc p

3*. Non métaux bloc p

Citer la combustion du soufre qui donne un oxyde acide.

4. Halogènes

Retour sur l'expérience introductive. AgX, couleurs très différentes.

On peut faire la même avec le plomb.

Exp. : Montrer Dibrome, Diode et dire que le dichlore est gazeux.

Évolution du rayon qui explique la nature à T,P ambiantes des dihalogènes.

5. Gaz rares

Pas de réactivité. Citer la découverte de l'Hélium dans le soleil.

LC21 : Solides cristallins (CPGE)

Bibliographie : Tout-en-Un. PCSI. Dunod

I) Cristal parfait

Dessin à 2 dimensions pour toute cette partie.

1. *Motif*
2. *Réseau*
3. *Maille conventionnelle*
4. *Cristal*
5. *Étude expérimentale*

Questions : quelle est la nature des sphères empilées ? Quelle est leur taille ?

Exp. : Diffraction des électrons. On remonte aux paramètres de maille. Les sphères sont des atomes, des molécules !

II) Empilement compact

1. *Description schématique*

3 transparents superposés. ABAB ABCABC

2. *Maille CFC*

Coordinance, compacité, population, masse volumique, densité.

Transparent avec les caractéristiques de HC et CC.

III) Cristaux métalliques

Objectif : relier structure à propriétés.

1. *Propriétés physiques et chimiques*

Mécanique, optique, électrique, thermique.

Température de fusion, densité.

Réducteurs, donnent des cations.

2. *Structure d'un métal*

Exp. : Changement de variété allotropique du fer.

Exemple du fer. CFC → CC quand ça refroidit.

Calcul de densité du fer pour les deux empilements. Expliquer la recaescence.

3. *Quels structures pour quel métal ?*

Transparent.

4. *Explications des propriétés*

Liaisons métalliques, expliquer malléabilité, ductilité. (Il y a un paragraphe dans le Tout en Un.)

5. *Sites interstitiels*

Insertion, substitution.

Alliage. Acier.

IV) Autres cristaux

1. *Cristaux ioniques*

Le rapport des tailles entre anions et cations détermine la géométrie.

Présentation de la blende.

2. *Cristaux covalents*

Diamant, graphite. Discussion de leurs propriétés.

3. *Cristaux moléculaires*

Eau

LC22 : Réactions d'oxydoréduction (CPGE)

I) Quelques rappels et compléments

1. Rappels

Définir : oxydant, réducteur, couple Redox, demie-équation, équilibrage, espèce amphotère.

2. Réaction de dismutation et de médiamutation

Exemples de couple : l'eau (et ses multiples couples), Fer III, II, 0.

3. Nombre d'oxydation

Définition. Règles de base.

Exemple sur les couples simples. Eau, Fer.

Bien dire que H^+ , H_2O , d'un point de vue rédox c'est pareil.

Exemple un peu plus compliqué sur sulfate.

II) Potentiel d'oxydoréduction et potentiel de Nernst

Exp. : Qualitatif Zn dans sulfate de cuivre et Cu dans sulfate de Zinc ; seul le premier réagit pourquoi ???

1. Potentiel d'oxydoréduction d'un couple

Grandeur thermodynamique permettant de prévoir l'évolution d'une réaction.

Exp. : Introduire la relation de Nernst à l'aide de la Pile Daniel (ddp : 1,1V) (Schéma, ddp, définition d'électrode ESH et potentiel d'électrode)

2. Relation de Nernst

Relation quantitative pour déterminer le potentiel d'oxydoréduction d'un couple en fonction des espèces chimiques.

Exp. : Vérification de cette loi l'aide de la pile Daniell.

3. Échelle des potentiels d'oxydoréduction

Les plus oxydants, les plus réducteurs...

Parler de la neutralisation des halogènes par le thiosulfate. Montrer quand la réaction est thermodynamiquement possible.

OdG : Montrer que pour $\Delta E = 0,25 \text{ V}$, $K > 10^4$

Remarque sur la cinétique, toujours rapide en phase homogène.

4. ECS

Point rapide sur cette électrode qui servira par la suite.

III) Applications

1. Dosage d'oxydoréduction

Suivi possible par indicateur colorée d'oxydoréduction (Ophen...) ou simplement changement de couleur des espèces mis en jeu car les espèces redox sont souvent colorées.

(Parler si le temps le permet des précautions lors des dosages manganométrique, iodométrique, chlorométrique)

Exp : Dosage des ion Cérium IV par le Fer II (suivi par changement de couleur des espèces et par potentiométrie) Florilège

2. Éthylotest

Exp. : écrire réaction + mettre un goutte d'alcool dans un éthylotest (si on a a disposition). $2(Cr_2O_7)^{2-} + 3CH_3CH_2OH + 16 H^+ = 3(CH_3COOH) + 4 Cr^{3+} + 11H_2O$

3. Piles, désinfectants, etc.

LC23 : Réactions de précipitation (CPGE)**I) Équilibre de précipitation***1. Réaction de précipitation*

Soit diiode solide donne diiode aqueux, soit cristal ionique donne ses ions.

Définition d'un précipité : dépôt solide en coexistence avec une phase solubilisée.

2. Condition d'existence du précipité

Produit de solubilité K_s , pK_s et condition d'existence. Diagramme d'existence/prédominance.

3. Solubilité

Définition. Calcul de solubilité.

II) Facteurs influençant la solubilité/précipitation*1. Effets d'ions communs*

Exp. : 2 tubes à essai. Sulfate de calcium. L'autre de l'eau distillée. Rajouter du carbonate de calcium.

Mesplède

Calcul de la solubilité.

2. Influence du pH Exp. : Influence du pH sur la solubilité de l'acide benzoïque. *Manipulation 69 – Mesplède, 100 manipulations de chimie générale et analytique.*

Donner la formule de la dépendance de la solubilité en fonction du pH.

3. Influence de la température

Exp. : Pluie d'or.

Généralement endothermique sauf le calcaire (carbonate de calcium) qui a un comportement inverse.

III) Applications*1. Dosage de Mohr*

Exp. : Nitrate d'Argent dans Chlorure de Sodium + Chromate de Potassium (indicateur de fin de réaction).

Le Maréchal, voir dosage par précipitation.

2. Recristallisation

- Hydrométallurgie, précipitation de l'hydroxyde $Fe_6(OH)_{12}$ Jarosite facile à filtrer.

- Traitement des eaux usées pour enlever les métaux lourds.

LC24 : Dosage suivi par potentiométrie (CPGE)**I) Cadre du dosage par suivi potentiométrique***1. Définition*

Relever la différence de potentiel entre deux électrodes en fonction du volume versé au cours d'un dosage.

2. Réactions suivies par potentiométrie

Réactions d'oxydoréduction. Qui ne peuvent pas être suivies par un indicateur coloré avec une précision suffisante.

Exemple de réaction : Fe^{2+} sur Ag^+ . Remarque on ne peut pas le traiter par aucune méthode habituelle.

3. Loi chimique exploitée : loi de Nernst

Rappel. Quelques mots sur l'ESH.

4. Mesure de potentiel

Différence de potentiels. Électrode référence, de travail.

Éventuellement citer les 3 espèces.

Quant au choix de l'électrode, on se souvient qu'il faut qu'une réaction de dosage soit totale, rapide et spécifique. Il faudra donc choisir une électrode qui ne rentre pas en compétition avec la réaction de titrage. En général pour les références : ECS ou électrode au sulfate mercurieux (il faut l'utiliser quand il y a des espèces Ag^+).

Concernant l'électrode de travail, il faut s'arranger pour éloigner un maximum le potentiel de l'électrode de celui de l'espèce à titrer (exemple : électrode d'argent dans le fer).

II) Dosages*1. Dosage direct*

Exp. : Fe^{2+} sur Ce^{4+} . Flexcam sur le voltmètre.

Remarque sur le potentiel à demie-équivalence. Dire que l'on peut remonter à des grandeurs thermo.

2. Dosage en retour

Exp. : Dosage de l'éthanol dans le vin par le Fer(II). Principe : dosage de l'excès de permanganate de potassium car la réaction de dosage direct est trop lente. Trouver une référence. Le *Florilège* marche avec du dichromate, mais cela fonctionne de la même façon avec le permanganate. NB : fabriquer soi-même son vin à partir d'éthanol absolu.

Conclusion : On peut remonter aux potentiels des couples lorsque l'on connaît les quantités introduites. Ouvrir sur la potentiométrie à courant imposé.

LC25 : Dosages acido-basiques (CPGE)**I) Dosage d'une base forte par un acide fort**

Commencer par faire une description du dispositif expérimental qui servira tout le long de la leçon.

Exp. : Dosage du Destop par l'acide chlorhydrique, par pHmétrie.

Méthode des dérivées et des tangentes.

Déterminer le pH à $V=0$, demie-équivalence (dire pseudo-solution tampon), équivalence (ici c'est 7!)

II) Dosage d'un acide faible par une base forte

Exp. : Dosage du vinaigre non frelaté par colorimétrie devant le jury. Et montrer la courbe faite en préparation.

On explique tout. Notamment le début de courbe tangent à la verticale (l'acide faible a une réaction avec l'eau et produit l'ion oxonium qui est dosé). pH à l'équivalence (dire nécessairement supérieur à 7), à la demie-équivalence etc...

III) Dosage d'un mélange de plusieurs acidités*1. Limitations de la pHmétrie*

Exp. : Dosage du vinaigre frelaté par suivi pHmétrique et conductimétrique. Prendre un point dans chaque zone. *Cachau, Expériences de la famille acide-base.*

Utilité du suivi conductimétrique.

2. Critère de séparation

Les pKa doivent être séparés de 4 (1^{er} terminé à 99% quand le 2nd commence).

3. Dosage d'un polyacide

Exp. : Graphe de dosage de l'acide phosphorique par HO^- . Utilisation du logiciel ChimSol. Normalement tous les trois pKa devraient se voir sauf qu'il y a un nivellement par le solvant.

Remarque sur le pH aux demies-équivalences égal à la moyenne des pKAs pour les espèces amphotères.

LC26 : Cinétique homogène (CPGE) ☆☆☆

Exp. introductive : Réaction du Mesplède fil rouge. Page 79, réactions des ions iodures avec les ions peroxodisulfates. Montrer que la réaction n'est pas instantanée.

I) Réaction chimique et vitesse de réaction

1. *Systèmes considérés*
2. *Vitesse de formation/disparition*
3. *Vitesse de réaction*
4. *Équation empirique de vitesse (Van't Hoff)*

Notion d'ordre. Subtilité ordre initial, ordre courant.

II) Méthode de suivi expérimental

1. *Physique*
2. *Chimique*
3. *Mise en application*

Exp. : Iodures (large excès) + peroxodisulfates. Suivi spectrophotométrique.

III) Analyse des résultats expérimentaux

1. *Dégénérescence de l'ordre*

Application à la réaction précédente.

2. *Méthode par intégration*

Application, ajustement sur l'ordre partiel 1.

3. *Méthode des vitesses initiales*

Montrer deux autres courbes faites en préparation, avec les iodures en excès de concentrations différentes. En revenir à l'ordre sur l'iodure. Mais c'est l'ordre initial.

4. *Temps de demie-réaction*

Vérification sur les courbes précédentes que c'est bien l'ordre 1.

IV) Influence de la température

1. *Expérience*

Exp. : L'effectuer en double avec des réactifs qui étaient initialement dans de la glace et de l'eau chaude. L'avancement de la réaction se voit à l'œil et les temps de réactions sont vraiment très différents.

2. *Loi d'Arrhenius*
3. *Énergie d'activation*

Agir : Pluridisciplinarité Maths Chimie avec travail sur la résolution d'équations différentielles non triviales.

LC27 : Évolution et équilibre chimique (CPGE) ☆

I) L'affinité chimique : critère d'évolution vers l'équilibre

1. Cadre du problème

Système chimique. Plusieurs constituants. A priori au départ hors équilibre puis déplacement vers l'équilibre. Contraintes p,T extérieurs. On suppose que la réaction chimique est la seule source d'irréversibilité (équilibre thermique et mécanique établis).

2. Affinité et second principe

Comment quantifier le fait qu'il y a évolution ? On va se baser sur le second principe et l'évolution vers un état d'entropie maximum (système isolée). $\delta_i S \geq 0$

Idée : relier une grandeur chimique (l'avancement) à l'entropie.

$T\delta_i S = Ad\xi$ c'est la définition de l'affinité chimique.

Propriétés de l'affinité : dépendance (P,T), unité et intensivité.

Remarque : on fait l'hypothèse de l'équilibre incomplet dans la suite de l'exposé (potentiel chimique défini même hors équilibre.)

3. Affinité et évolution d'un système

$Ad\xi \geq 0$ discuter des signes, du sens d'évolution.

4. Relation entre affinité et fonction d'état

Rappel $P = P_{ext}$ et $T = T_{ext}$ par l'équilibre thermique et mécanique.

Écrire premier principe. Voir que la fonction d'état pertinente est G. Relier finalement G à $\Delta_r G$ que l'on sait être $\sum \nu_i \mu_i$.

Transition : Il faut relier ces notions à des grandeurs chimiques exploitables.

II) Constante d'équilibre

1. Potentiels chimiques

Récapitulatif des expressions des potentiels chimiques en fonction des conventions corps pur, solution infiniment diluée, etc...

Dire au minimum que $\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i$

2. Affinité chimique standard et constante d'équilibre

$$A = A^0 - RT \ln \Pi a_i^{\nu_i}$$

$A=0$ on a équilibre donc $A^0 = RT \ln(K)$, lien avec $\Delta_r G^\ddagger$

Exp. : On met de l'acide éthanoïque dans l'eau. Calculer le Qr. Calculer le pH. Remonter à Ka. Dire que l'on était dans le sens direct.

3. Quotient de réaction et évolution vers l'équilibre

Petit schéma qui va bien.

Exp. : On rajoute de l'acide (HCl), ce sont de nouvelles conditions initiales (Qr), dire sens indirect, calcul prévisionnel du pH. Vérification avec le pHmètre.

4. Utilisation des grandeurs thermodynamiques

Approximation d'Ellingham.

Exp. : Diode dans l'eau. On montre la dissolution, on dit qu'on aurait pu calculer la solubilité qui vaut ... On la vérifie grâce aux grandeurs thermodynamiques.

5. Règle de Gibbs et rupture d'équilibre

Q n'est pas égal à K lors d'une dissolution d'un solide et que celui-ci n'est en assez grande quantité pour saturer. La variance baisse d'une unité quand le solide est présent.

III) Déplacement d'équilibre

On garde tous les paramètres fixés sauf un.

1. Influence de la température

Relation de Van't Hoff.

Exp. : Influence de la température sur un équilibre d'échange de ligand. Hexaaquacuvivre II + Ion chlorure. On chauffe, ça change de couleur. *Porteu de Buchère – Épreuve orale du Capes de Chimie. p69*

2. Influence de la pression

Exp. : Gaz roux. *BUP 879.1*

LC28 : Optimisation d'un processus de synthèse industrielle (CPGE) ☆☆☆☆☆

Bibliographie : Chimie inorganique – Casalot et Durupthy. Chimie, 1. chimie moléculaire minérale. A. Dubois-Salmon.

I) Problématique de la synthèse industrielle*1. Industrie*

Transformation des objets et énergies naturelles pour les amener à un état mieux adapté à nos besoins.

2. Optimisation

Critères (qualité, transport (produire les réactifs sur place) rendement, rapidité, respect environnement, risques, reproductibilité). En fin de compte le "coût" peut tout résumer.

3. Exemple sur la synthèse de l'ammoniac

Utilité de l'ammoniac (engrais).

Réaction. Et $\Delta_r G^\circ$ en fonction de la température.

On a une variance de 3 donc on peut fixer l'équilibre en imposant 3 grandeurs physico-chimiques par exemple P,T et une pression partielle. On va jouer sur ces paramètres et on va voir comment optimiser cette synthèse.

II) Étude thermodynamique : constante d'équilibre

Toujours être très général sur les concepts d'optimisation, et appliquer sur la synthèse de l'ammoniac.

1. Influence de la température

Loi de Van't Hoff. Exo, endo. Dire que tout est histoire de compromis.

Exp. : Influence de la température sur un équilibre d'échange de ligand. Hexaaquacuvivre II + Ion chlorure.

On chauffe, ça change de couleur. *Porteur de Buchère – Épreuve orale du Capes de Chimie. p69*

Température d'inversion.

Application à la synthèse de l'ammoniac.

2. Influence de la pression

Loi de le Chatelier.

$\Delta\nu_{gaz} < 0$. Attention, même si la constante d'équilibre est fixée, on favorise la réaction quand on augmente la pression.

Exp. : Gaz roux.

3. Influence de la composition initiale

Calcul dans le bouquin. Bien expliquer la problématique

4. Influence de l'ajout ou du retrait d'un constituant

Attention, soit à T,V constant, soit à T,P constant.

Retrait, ajout progressifs de constituants. Difficile pour l'ammoniac. Mais plus simple dès lors qu'il y a plusieurs phases.

Dire que l'on peut ajouter des constituants inactifs...

Transition : Où en sommes nous vis-à-vis de la synthèse de l'ammoniac? Transparent. Haute pression, température basse.

III) Étude cinétique*1. Influence de la température*

Plus c'est chaud, plus c'est rapide mais coût énergétique et pour certaines transformations cela diminue la constante d'équilibre. Notamment pour celle étudiée ici.

Exp. : *Iodure + peroxodisulfate. Cinétique homogène. Mesplède manipulation 79*. L'effectuer en double avec des réactifs qui étaient initialement dans de la glace et de l'eau chaude. L'avancement de la réaction se voit à l'œil et les temps de réactions sont vraiment très différents.

2. Catalyse

Rapide topo sur la catalyse (hétérogène, homogène et enzymatique). Avantages inconvénients.

Souvent c'est très compliqué donc on fait des tests. Problématique de la récupération du catalyseur.

3. Application à la synthèse de l'ammoniac

Montrer les courbes et choisir pour la synthèse de l'ammoniac.

750K, 200 bar, $t = 1$ minute, $P_{NH_3}/P_{tot}=0,17$.

IV) Réalisation industrielle

Présentation de la dernière section de la synthèse. Mentionner la problématique de l'obtention du dihydrogène en amont, de l'azote isolé de l'air (par distillation de l'air liquide). Et aussi la séparation de l'ammoniac.

Parler de la difficulté de passer de la chimie de laboratoire à la chimie industrielle. Homogénéisation, système ouvert, bouclage, transport des réactifs.

Transparent récapitulatif de toute la chaîne industrielle.

Conclusion : Cette leçon fut plus intéressante que les autres. Cela étant du à la présence du mot "industrie" dans son intitulé.

LC29 : Hydrométallurgie (CPGE) ☆☆☆

Bibliographie : Tout-en-Un PSI/PSI*. Chimie inorganique – Casalot et Durupthy. BUP770. BUP857.1
(Mot clé : hydrométallurgie)

I) L'Hydrométallurgie*1. Hydrométallurgie, principes*

Définition (on passe par une solution aqueuse). À comparer à la pyrométallurgie.

Les produits initiaux proviennent des minerais naturels (blende, bauxite) et aussi des eaux "polluées" par des ions métalliques → Recyclage.

2. De l'importance de l'hydrométallurgie

L'hydrométallurgie représente 20% Cuivre, 80% Or et 90% du Zinc de la production mondiale des ces métaux.

3. Grandes étapes de l'hydrométallurgie

Minerai – Mise en solution (oxydoréduction – acido-basique) – Élimination des impuretés (précipitation et filtrage) – Électrolyse – Métal raffiné.

II) Hydrométallurgie du Zinc*1. Du minerai à la solution aqueuse*

a. Provenance de l'élément Zinc et premier traitement mécanique

b. Grillage

c. Lixiviation (attaque d'un minerai par une solution aqueuse)

Exp. : Surveiller précautionneusement le pH lors de la lixiviation. Qu'il reste proche de 1 sinon (s'il monte jusqu'à 5) il sera impossible de détecter du FerIII et par conséquent la Jarosite n'aura pas besoin d'être évacuée. (On veut une solution vert pomme).

Exp. : En parallèle (par précaution), chauffer longtemps à 65°C au bain marie pour récupérer un liquide visqueux qu'on filtrera pour obtenir les ions Zn et Cu (on récupère du bleu ciel).

2. Purification

a. Précipitation d'hydroxyde (blabla sur hydroxyde de fer qu'on ne peut pas filtrer facilement, passer par la jarosite...)

b. Cémentation (Principe et montrer les diagrammes E-pH, Zn puissant réducteur, dire que c'est plus compliqué pour certaines impuretés).

3. Réduction par électrolyse

Blabla sur le **choix des électrodes**.

Exp. : Électrolyse d'une solution de sulfate de zinc. *Famille redox. Cachau*

III*) Hydrométallurgie de l'Or

Tout-en-Un. Complément du chapitre 8.

Conclusion : Ouvrir sur l'hydrométallurgie des terres rares (Nb, Co, Y).

LC30 : Diagrammes E-pH (CPGE) ☆

Introduction : Synthétiser l'introduction du Tout-en-Un PSI/PSI*

I) Diagramme Potentiel-pH d'une espèce

1. *Loi de Nernst pour une espèce engagée dans un couple acido-basique*

On s'arme de l'exemple du Chlore. On écrit la réaction HClO et Cl^- . Écrire la loi de Nernst en sortant le pH. Introduire conventions de travail concernant les prédominances.

2. *Diagramme potentiel-pH*

Projection du diagramme du Chlore.

Trois types de couples : redox avec échange de proton, redox classique, acido-basique.

Frontières et pentes, position des espèces dans le diagramme (à relier au no).

Une frontière non véritable est associée à un couple redox. Exemple sur le dichlore qui est réducteur sur une frontière et oxydant sur l'autre.

Exp. : Manipulation Encre Sympathique *Red ox family. Cachau p.204*

3. *Analyse d'un diagramme potentiel-pH*

Domaine d'existence, de prédominance, médiamutation, dismutation.

Parler du danger d'un milieu trop acide, dichlore formé.

II) Superposition de diagramme

1. *Réactions entre deux couples redox*

Superposition du couple dioxygène et eau sur le EpH du chlore. Qui va réagir avec qui? Écriture de la constante d'équilibre en fonction de la différence de potentiel. Réaction totale... Dire que plus on est haut en E, plus on est un oxydant fort, blablabla.

2. *Diagramme E-pH de l'eau et existence des espèces en solution aqueuse*

3. *Superposition de diagramme E-pH et prévision de réaction*

Superposition, on trace une droite verticale. On écrit dans l'ordre les espèces redox, on entoure celles présentes, réactions plus fort red, plus fort ox etc.

4. *Cinétique des réactions d'oxydo-réduction*

Les réactions en phase homogènes sont quasi instantanées. Les autres, on ne peut rien dire. Citer l'ion hypochlorite qui ne devrait pas exister en solution aqueuse (car dioxygène gazeux dans l'équation).

III) Application au titrage

Exp. : Titrage d'une eau de Javel par iodométrie. *Mesplède*

Conclusion : Importance industrielle, hydrométallurgie. On remarque aussi que certaines réactions qui devraient thermodynamiquement avoir lieu ne se passent pas. Nécessité de prendre en compte l'aspect cinétique. $i=f(E)$

LC31 : Corrosion humide des métaux (CPGE) ☆

Bibliographie : Tout-en-Un PSI/PSI*. Cachau, redox

Introduction : E_pH et $E=f(i)$ déjà vus. Maintenant on va essayer de comprendre les phénomènes de corrosion et essayer de trouver un moyen de les éviter.

Exp. : Clous dans différents milieux corrosifs. *HPrépa PSI*

I) Généralités sur la corrosion*1. Définitions*

Différents types d'oxydants. Surtout O_2 , H_2O . Différence corrosion sèche, corrosion humide.

2. Aspects thermodynamiques

$E-pH$ pour savoir si le métal peut se faire oxyder. Préciser que l'on travaille avec des concentrations de trace très faibles (car dioxygène dissous en très petite quantité).

Définition des trois zones corrosion, immunité et passivité.

3. Aspects cinétiques

Il va falloir étudier des intensités potentiels.

II) Corrosion différentielle*1. Réactions redox à une seule électrode*

À opposer à pile et électrolyse.

La moindre inhomogénéité crée des anodes et cathodes locales.

2. Zones corrodées

Potentiels locaux.

Exp. : Clou dépassant de l'agar-agar. *Red ox family et Sarrazin*

La réduction du dioxygène se fait dans la zone la plus oxygénée.

L'oxydation du Fer se fait dans la zone la moins oxygénée.

3. Généralisation

Causes : gradient de composition de l'alliage, de T, de $[O_2]$ (coques de bateau)

4. Rôle des ligands dans la corrosion*

Explication.

Exemple sur l'eau de Mer corrode plus par la présence du Cl^- .

III) Protection contre la corrosion

Enjeu économique considérable.

1. Passivation

Aluminium/alumine. Acier inoxydable.

2. Traitement de surface

Recouvrement non métallique, réaction chimique de surface, revêtement métallique.

3. Protection par potentiel imposé

Le générateur emmène le Fe dans sa zone d'immunité.

Exp. : Trouver expérience dans *Redox Family*.

4. Anode sacrificielle

Citer le rôle du zinc.

Exp. : Trouver expérience dans *Redox Family*.

Citer les statues retrouvées sous l'eau. Cf. exo du Tout-en-Un.

LC32 : Configuration et conformation (CPGE) ☆☆☆

Fil rouge : Différencier la structure dès lors qu'il y a différence de propriétés chimiques ou physiques. Grande différence par rapport à la leçon au lycée : présentation de la nomenclature CIP. Bien s'amuser avec des modèles moléculaires.

I) Stéréoisomérisation de Conformation

Lancer manip de l'Amylase, dire que on verra que la conformation a bien une importance sur la réactivité. Rappel : stéréochimie, stéréoisomère.

1. Définition

Stéréochimie de conformation

2. Éthane

Exemple sur le modèle moléculaire, représentation de Neumann.

Classification des différentes conformations, angle de torsion.

3. Butane

Parler à ce moment de la stabilité vis-à-vis de l'énergie.

Exp. : Amylase + Amidon + acide/ base → Importance de la conformation.

(Préparer quatre tubes à essai, avec de l'amidon (en pratique, demander du thiodène), 3 avec de l'amylose, un sans. Avec de la soude et de l'acide chlorhydrique, mettre les tubes à pH 7, 2 et 13. Chauffer à 37 degrés pendant 10 minutes, vérifier que l'amidon n'est détruite que dans un cas. Test au lugol (I_2 dans KI), qui devient bleu en présence d'amidon). Explication : le pH change la conformation de l'amylose et la rend inactive.

Autres exemples (changement de conformation lors de la cuisson des œufs qui provoque la coagulation, etc.).

II) Stéréoisomérisation de configuration

1. Définitions

Chiralité – Diastéréoisomères – Énantiomères.

Modèles moléculaires.

Origine : Carbone asymétrique, double liaison C=C, cas exotiques.

2. Isomérisation due à une double liaison C=C

Exp. : Acide maléique – Acide fumarique. Différence de solubilité.

Tableau avec autres différences. Nécessité de différencier ces molécules.

Nomenclature Z-E, introduire CIP dans le cas de molécule plus complexe.

3. Isomérisation due à un carbone asymétrique

On reprend la molécule précédente.

Discussion sur les propriétés chimiques et physiques des diastéréoisomères. Des énantiomères.

Exp. : Odeur du limonène + ou - et pouvoir rotatoire.

Importance de distinguer les énantiomères. Mélange racémique. Propriétés biologiques. Ibuprofène.

Agir : Scandale de la thalidomide.