
Agrégation de Physique
Session 2012

Plans de leçons et montages

Etienne Thibierge
`etienne.thibierge@ens-lyon.fr`
`http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge`

22 avril 2013

Préambule

Ce document regroupe les fiches d'oral que j'ai préparées pour la session 2012 de l'agrégation de physique. La quasi-totalité des plans a été préparée en commun avec mon binôme, Jean-Baptiste Caussin. Chaque fiche contient une liste de bibliographie, le plan prévu pour la leçon, et éventuellement certains commentaires ou démonstrations supplémentaires.

J'espère que ces fiches pourront vous aider à construire vos propres plans, d'abord en présentant un point de vue, partial et discutable, sur chaque leçon, mais surtout en donnant la liste de bibliographie qui nous a semblé la plus pertinente sur le sujet de la leçon. En revanche il ne faut pas espérer trouver ici des leçons clés en main, et encore moins des leçons parfaites ! Certaines manquent vraiment de recul.

Merci à ceux qui m'ont signalé des erreurs ou des incohérences dans les bonus accompagnant les plans. N'hésitez pas à faire de même :)

Table des matières

I	Leçons de physique	5
1	Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au roulement et au glissement.	6
2	Caractère non-galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.	7
3	Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Équilibrage statique et dynamique. Exemples.	8
4	Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique.	10
5	Exemples d'utilisation des lois de conservation en dynamique des systèmes.	11
6	Principes de la cinématique relativiste. Conséquences.	13
7	Dynamique relativiste. Exemples.	15
8	Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples.	16
9	Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide; validité. Relation de Bernoulli; limites et applications.	18
10	Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides : applications.	19
11	Modèle du gaz parfait.	21
12	Fonctions d'état caractéristiques d'un système à l'équilibre thermodynamique. Identités thermodynamiques. Applications.	23
13	Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques.	25
14	Thermodynamique des phénomènes irréversibles.	27
15	Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.	29
16	Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases.	30
17	Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples.	32
18	Introduction au facteur de Boltzmann à partir d'un exemple au choix.	34
19	Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Application aux transferts thermiques radiatifs.	36
20	Phénomènes de transport. Illustrations.	37
21	Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.	38
22	Induction électromagnétique. Applications.	40
23	Résonance magnétique. Exemples et applications.	42
24	Systèmes bouclés et applications.	43
25	Traitement analogique d'un signal électrique. Etude spectrale. Exemples et applications.	45
26	Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.	47
27	Ondes acoustiques dans les fluides.	48
28	Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.	49
29	Propagation guidée. Exemples et applications.	51
30	Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modèle microscopique.	52
31	Effet de peau. Comportement d'une onde électromagnétique à la surface d'un conducteur.	54
32	Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique.	56
33	Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat. Exemples.	57
34	Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix.	58
35	Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.	60
36	Interféromètres à division d'amplitude. Applications.	62
37	Diffraction de Fraunhofer. Applications.	64
38	Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique.	66
39	Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications.	68
40	Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.	70
41	Aspect ondulatoire de la matière. Notion de fonction d'onde.	72
42	Exemples de phénomènes quantiques.	73
43	Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples.	75
44	Effet tunnel. Applications.	77
45	Le noyau : stabilité, énergie. Applications.	79
46	Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Système à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.	80
47	La molécule : stabilité, énergie. Applications.	82
48	Cohésion de la matière condensée.	84

49	Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus.	86
50	Capacités thermiques : descriptions, interprétations microscopiques.	88
51	Paramagnétisme, ferromagnétisme, approximation de champ moyen.	90
52	Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.	91
53	Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.	93
54	Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.	95
55	Exemples d'effets de non-linéarité sur le comportement d'un oscillateur.	96
56	Illustration de l'intérêt de la notion de symétrie dans différents domaines de la physique.	98

II Leçons de chimie 100

1	Solutions électrolytiques : mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (L)	101
2	Le squelette carboné des hydrocarbures : relation entre structure et propriétés. (L)	103
3	Molécules de la santé : acides aminés et peptides. (L)	105
4	Principe et applications de la spectrophotométrie. (L)	107
5	Équilibre chimique en solution aqueuse : cas des couples acido-basiques. (L)	108
6	Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (L)	109
7	Cinétique de réactions (catalyse exclue). (L)	110
8	Catalyse et catalyseurs. Applications. (L)	112
9	Estérification et hydrolyse des esters. (L)	113
10	Saponification des esters ; applications. (L)	114
11	Synthèse et dosage d'un composé d'usage pharmaceutique. (L)	116
12	Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (L)	118
13	Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (L)	120
14	Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires et ménagers. (L)	122
15	Contrôle de qualité des produits de la vie courante. (L)	123
16	Colorants et pigments : extraction, synthèse, identifications. (L)	124
17	Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (L)	125
18	Dosages directs et indirects. (L)	127
19	Étude expérimentale du caractère évolutif des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique. (CP)	128
20	Illustrations expérimentales des relations entre structure et propriétés des molécules. (CP)	130
21	Cristaux ioniques : du modèle à la réalité. (CP)	131
22	Métaux et alliages : structures. (CP)	132
23	Enthalpie de réaction : mesures et applications. (CP)	133
24	Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (CP)	134
25	Illustrations expérimentales et applications des réactions de précipitation. (CP)	135
26	Principe et illustration des dosages potentiométriques (pH-métrie exclue). (CP)	136
27	Cinétique homogène : étude expérimentale. (CP)	138
28	Mécanismes réactionnels en cinétique homogène : illustrations. (CP)	139
29	Illustrations expérimentales et applications des lois de déplacement des équilibres. (CP)	141
30	Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (CP)	143
31	Lecture et illustrations des diagrammes d'Ellingham ; application à la pyrométallurgie. (CP)	145
32	Hydrométallurgie. (CP)	146
33	Application des diagrammes potentiel-pH (construction exclue). (CP)	147
34	Application des courbes intensité-potentiel. (CP)	149
35	Corrosion humide et protection des métaux contre la corrosion. (CP)	150
36	Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbone-carbone. (CP)	152
37	Conformations et configurations ; illustrations expérimentales. (CP)	153
38	Macromolécules. (CP)	155

III Montages de physique 157

	Préambule aux plans de montages	158
1	Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.	159
2	Phénomènes de surface.	161
3	Dynamique des fluides.	162
4	Thermométrie.	163
5	Transitions de phases.	165
6	Instrument(s) d'optique.	166

7	Interférences à deux ondes ; conditions d'obtention.	167
8	Diffraction des ondes lumineuses.	168
9	Spectrométrie optique.	169
10	Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire.	170
11	Production et analyse d'une lumière polarisée.	171
12	Émission et absorption dans le domaine optique.	172
13	Lasers.	173
14	Photorécepteurs.	174
15	Production et mesure de champs magnétiques.	176
16	Milieux magnétiques.	177
17	Métaux.	178
18	Matériaux semi-conducteurs.	179
19	Condensateurs et effets capacitifs. Applications.	180
20	Induction, auto-induction.	181
21	Conversion de puissance électrique-électrique.	182
22	Exemples de conversion électrique-mécanique.	183
23	Capteurs et transducteurs.	184
24	Mesures électriques (mesure de fréquences exclue).	185
25	Amplification des signaux.	186
26	Mise en forme, transport et détection de l'information.	187
27	Acquisition, analyse et traitement des signaux.	188
28	Mesures de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).	189
29	Mesures de longueur.	190
30	Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).	191
31	Instabilités et phénomènes non linéaires.	192
32	Ondes : propagation et conditions aux limites.	193
33	Ondes acoustiques.	195
34	Résonance.	196
35	Oscillateurs auto-entretenus.	197
36	Couplage des oscillateurs.	198
37	Filtrage des signaux.	199
38	Régimes transitoires.	200
39	Phénomènes de transport.	201
40	Phénomènes dissipatifs.	202

Première partie
Leçons de physique

LP01 : Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au roulement et au glissement.

♣ Bibliographie

- [2] *Les milieux granulaires : entre fluide et solide*, B. Andreotti : énoncé précis et complet des lois d'Amontons et Coulomb, et seule référence pour l'aspect microscopique
 [60] *Mécanique II*, J.P. Faroux et J. Renault : bon à lire car assez différent des autres, mais pas crucial
 [107] Tec&Doc MP-MP*, C. More et D. Augier
 [110] Tec&Doc PC-PC*, S. Olivier : contrairement aux apparences, il est très différent de celui de MP, et plutôt moins bien sur le sujet à part pour un exemple
 [132] Dunod PC-PC* ou MP-MP*, M.N. Sanz : attention à l'énoncé incomplet des lois de Coulomb

♣ Pré-requis

Cinématique du solide
 Théorèmes généraux de la mécanique du solide

♣ Idées à faire passer

Différence de nature entre les lois de Coulomb
 Choix de l'équation à rajouter suivant le cas de glissement ou non
 Rôle pas toujours négatif des frottements

♣ Plan

Introduction

Besoin de modéliser les actions de contact pour pouvoir appliquer les théorèmes généraux.

1. Contact entre deux solides

1.1. Description cinématique

[132, 107] Position du problème. Vitesse de glissement, indépendance vis-à-vis du référentiel. Roulement et pivotement.

1.2. Actions de contact

[107, 60] Description par une résultante et un moment. Contact ponctuel à présenter comme une hypothèse, et dire que les résultats sont plus généraux. Bien dire qu'a priori les actions de contact sont indéterminées.

2. Description des actions de contact : lois d'Amontons et Coulomb

2.1. Énoncé des lois

[132, 2] Énoncé des lois, sans oublier celle d'Amontons. Bien opposer les cas statique et dynamique. ODG des coeffs. Cône de frottement.

♣ **Manip** : faire glisser des solides sur le plan incliné. Hystérésis dû à μ_s et μ_d différents.

2.2. Origine microscopique

[2] Rugosité de la surface.

2.3. Aspect énergétique

[107] Puissance des actions de contact.

3. Exemples

3.1. Mouvement de stick-slip

♣ **Manip** : dispositif ENSL

[132, 107] Résolution en opposant bien phase statique et dynamique (exos).

3.2. Effet rétro au billard

[110] Exo corrigé. Opposer les utilisations des lois de Coulomb.

3.3. Démarrage d'une moto

[107] Exo corrigé. À ajuster en fonction du temps : on montre que ce sont les frottements qui permettent à une moto de démarrer.

Conclusion

Importance des contacts pour la transmission de mouvement.

LP02 : Caractère non-galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.

♣ Bibliographie

- [1] BUP 939, *Dynamique de l'atmosphère terrestre : mécanique élémentaire appliquée à un problème complexe*, Thierry Alhalel, Décembre 2011
[17] *Mécanique 1ère année*, P. Brasselet : très complet et très clair
[81] Tec&Doc PCSI, P. Grécias
[115] *La physique par la pratique*, B. Portelli

♣ Pré-requis

Mécanique newtonienne
Changements de référentiel
Mécanique des fluides

♣ Idées à faire passer

Ordres de grandeurs
Certains effets ne s'expliquent que parce que le référentiel terrestre n'est pas galiléen.

♣ Plan

Introduction

La Terre n'a aucune raison d'être un référentiel galiléen privilégié, cf. [17]

1. Le référentiel terrestre

1.1. Différents référentiels

[17] Définir le référentiel de Copernic, géocentrique, terrestre. Caractère galiléen approché.

1.2. Notion de jour

[115] Jour sidéral, jour solaire. ODG de la vitesse de rotation.

2. Effets de la translation du référentiel terrestre : les marées

2.1. Terme de marée

[17, 81] Faire apparaître le terme différentiel de marées à partir du PFD.

2.2. Marées océaniques

[17] Théorie statique de Newton : bourrelet, marées de vives eaux, mortes eaux.

[115] ODG de marnage : limite de la théorie statique.

3. Effets de la rotation du référentiel terrestre

3.1. Écriture du PFD

[à savoir] Identifier les termes et donner des ODG pour négliger les termes de marée et la précession des équinoxes.

3.2. Chute libre et définition du poids

[17] La force d'inertie d'entraînement est incluse dans le poids.

3.3. Déviation vers l'est

[81, 115] Traitement par la méthode de perturbation.

3.4. Vents géostrophiques

[115, 1, 17] Écrire l'équation de Navier Stokes, la simplifier à l'aide d'ODG des nombres de Reynolds et de Rosby. Régime stationnaire : vitesse orthogonale au gradient de pression, cyclone et anticyclone. Illustrer avec des images du CD.

Conclusion

Pour l'expérience courante le référentiel terrestre est souvent galiléen, mais il y a beaucoup d'effets qui ne s'expliquent que parce qu'il ne l'est pas. Question du caractère vraiment galiléen du référentiel de Copernic ?

LP03 : Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Équilibrage statique et dynamique. Exemples.

♣ Bibliographie

[32] *Mécanique 2ème année*, C. Chèze : livre de sciences industrielles, donc formalisme de torseurs assez imbuvable. Il complète utilement le Pérez sur certains détails, mais n'est pas vraiment exploitable tel quel.

[117] *Mécanique*, J.P. Pérez : contient presque tout ce qu'il faut, et dans un formalisme de physicien

♣ Pré-requis

Théorèmes de la mécanique

Matrice d'inertie

♣ Idées à faire passer

Caractère inconnu des actions de contact qui nécessite une modélisation

En quoi consiste l'équilibrage

Mais surtout : la SI c'est nul

♣ Plan

Introduction

Intérêt d'étudier ce type de mouvements (décomposition en translation + rotation).

1. Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe [117]

1.1. Position du problème

Schéma des notations : axes, angle, repères liés au solide et au bâti, position du centre d'inertie.

1.2. Équations du mouvement

T.R.C., T.M.C., bilan des inconnues et des équations. Il manque une équation.

1.3. Modélisation des efforts de liaison

Définir la liaison pivot parfaite. Réalisation technologique (image CD).

1.4. Application aux machines tournantes

Parler de mise en rotation, et de l'insuffisance du modèle de liaison parfaite). Volant d'inertie.

2. Équilibrage [117, 32]

2.1. Principe et objectifs

Les efforts de liaison dépendent du mouvement et sont donc non-maîtrisés.

✂ **Manip** : montrer la nécessité de l'équilibrage à partir du dispositif de démonstration

2.2. Équilibrage statique

Objectif : annuler les termes de la matrice d'inertie qui interviennent dans les équations du T.R.C. Conséquence : le centre d'inertie du système est placé sur l'axe de rotation.

Réalisation : on ajoute ou on enlève une masse. Montrer sur le dispositif.

[à savoir] Application : roue de voiture. Masse roue : 10kg, centre d'inertie décalé de 1mm, comparer la force d'inertie au poids de la voiture (que doit supporter l'essieu). Quelle masse mettre pour équilibrer statiquement ?

2.3. Équilibrage dynamique

Objectif : annuler les termes de la matrice d'inertie qui interviennent dans les équations du T.M.C. Conséquence : l'axe de rotation devient axe principal d'inertie du solide.

Réalisation : on met 2 masses, écrire les équations. Montrer sur le dispositif.

[à savoir] Application roue de voiture : on impose de placer les masses sur la jante juste au-dessous des pneus, ce qui fixe les 2 cotes z_1 et z_2 ainsi que les rayons (unique solution au problème).

2.4. Équilibrages industriels

[32] En pratique : analyse vibrationnelle.

Conclusion

Importance industrielle.

♣ Remarques

- ▷ Les deux équilibrages ne sont pas indépendants : un solide équilibré dynamiquement est nécessairement aussi équilibré statiquement.
- ▷ La démonstration expérimentale de l'équilibrage sur un système trop simple (comme c'est le cas du montage canonique avec une tige axe de rotation + une masse tenue par une noix sur l'axe x) peut conduire à des confusions. En effet, ses symétries sont telles que de base $I_{yz} = 0$. Si on réalise l'équilibrage statique de la façon « intuitive », i.e. en mettant les deux masses en vis à vis, alors on annule le terme I_{xz} , et donc l'équilibrage dynamique est directement réalisé.
- ▷ J'ai testé cette leçon, la longueur est correcte.

LP04 : Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique.

♣ Bibliographie

- [16] *Mécanique 2*, J. Boutigny : le contraire du Pérez, les calculs sont clairs mais la démarche moins
 [33] *Mécanique quantique I*, C. Cohen-Tannoudji : traitement très complet et très clair de la RMN en complément F-IV
 [66] *Les astuces de Feynman*
 [117] *Mécanique*, J.P. Pérez : les calculs ne sont pas posés très clairement, mais la démarche l'est

♣ Pré-requis

Théorèmes généraux de la mécanique des solides
 Bases de magnétisme

♣ Idées à faire passer

Caractère de l'approximation gyroscopique
 Comportement paradoxal

♣ Plan

Introduction

Faire constater sur la toupie : le poids voudrait la faire tomber, et pourtant elle tourne.

1. Introduction à partir de l'étude de la toupie

Bien rattacher tous les paragraphes au comportement de la toupie, et préciser à chaque fois que c'est général.

1.1. Cinématique : angles d'Euler

[117] p.217. Bien définir le référentiel galiléen, les 3 référentiels d'Euler et les angles associés.

1.2. Équations du mouvement

[117] p.356 pour l'idée, [16] pour le calcul dans le paragraphe "cas général". Écrire le T.M.C. avec changement de repère.

1.3. Approximation gyroscopique

Énoncer avec le moment cinétique, en déduire la condition sur les vitesses de rotation en supposant que les trois composantes de la matrice d'inertie ont le même ODG.

1.4. Précession et comportement paradoxal

[117] pour l'idée, [16] pour le calcul. Obtenir le mouvement de précession. Comportement paradoxal.

2. Conséquences dans le domaine macroscopique

2.1. Précession des équinoxes

[117] À traiter qualitativement, sans trop entrer dans les détails : c'est tout comme la toupie. Vérifier numériquement la validité de l'approximation gyroscopique.

2.2. Gyroscopie équilibré

[117] Direction fixe. Montrer sur le gyroscope de démonstration. Attention à ne pas s'emmêler : il n'y a pas besoin de l'approximation gyroscopique pour traiter le gyroscope équilibré.

[66] Applications : gyroscope directionnel et horizon artificiel.

3. Conséquences dans le domaine microscopique [33, 117]

3.1. Moment cinétique et moment magnétique

Si temps : on peut obtenir le rapport gyromagnétique avec le modèle de Bohr.

3.2. Précession de Larmor

Obtenir l'équation de Larmor : on retrouve une précession comme précédemment. Vérifier numériquement l'approximation gyroscopique.

3.3. Résonance magnétique

Calcul dans le référentiel tournant.

Conclusion

Ouvrir à la R.M.N.

LP05 : Exemples d'utilisation des lois de conservation en dynamique des systèmes.

♣ Bibliographie

[17] *Mécanique 1ère année*, P. Brasselet

[73] *1001 questions sup*, C. Garing

[131] Dunod Sup, M.N. Sanz : peut être facilement remplacé par n'importe quel autre livre de sup

[132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz : chapitre sur les bilans en mécanique des fluides

♣ Pré-requis

Mécanique du point

Mécanique du solide

Principe des bilans

♣ Idée à faire passer

Bien choisir le système et appliquer une loi de conservation peut permettre de résoudre un problème même en présence de forces inconnues

♣ Plan

Introduction

Les équations de la dynamique donnent dans certains cas des lois de conservation.

1. Les différentes lois de conservation

1.1. Conservation de la quantité de mouvement

[132] Ex : propulsion d'une fusée

1.2. Conservation de l'énergie mécanique

Choisir un des deux exemples en fonction de l'humeur :

Ex : pendule pesant. ☞ **Manip** : sur quelques oscillations.

[73] Ex : saut à la perche et ODG

1.3. Conservation du moment cinétique

[à savoir] cf. bonus. On s'assoit sur un tabouret tournant avec une roue dans les mains. On force la roue à tourner dans un sens. Quand on tourne la roue, ça fait tourner le tabouret !

☞ **Manip** : faisons les guignols sur un tabouret !

2. Mouvement dans un champ de force central(e) [17, 131]

2.1. Position du problème

Poser des notations, et donner des exemples de forces centrales conservatives (ressort, gravité, électrostatique).

2.2. Conservation du moment cinétique

Application du TMC. Conséquences : trajectoire plane et loi des aires.

2.3. Conservation de l'énergie

Énergie potentielle effective. Allure de la trajectoire : état de diffusion, état lié, trajectoire circulaire.

3. Collisions [17]

3.1. Position du problème

Définir un choc comme force infinie et durée de contact nulle.

3.2. Lois de conservation lors d'un choc

Conservation de la qté de mvt et de l'énergie si choc élastique, à bien dégager.

3.3. Choc entre deux billes

Considérer deux billes identiques.

[à savoir] Résoudre les équations de conservation : la première bille s'arrête, et la deuxième repart avec la vitesse initiale.

3.4. Application au pendule de Newton

☞ **Manip** : montrer un tel pendule et l'effet que tout le monde connaît.

☞ **Attention** : Brasselet donne une interprétation floue voire fausse. Il y a des transferts de quantité de mouvement entre billes au contact, mais il est à mon avis douteux de dire que la bille n part avec la quantité de mouvement de $n - 1$ et va rentrer dans $n + 1$ alors que les billes sont en contact.

Conclusion

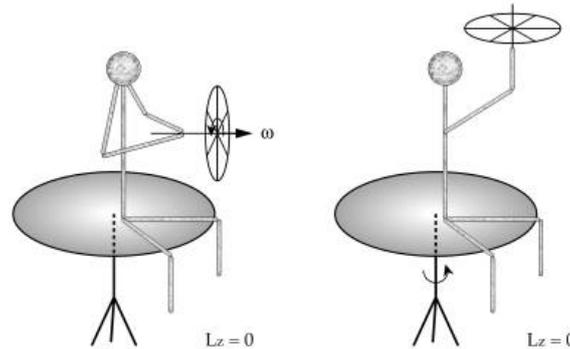
Caractère modèle des lois de conservation, qui sont vraies tant qu'on néglige des trucs. Découverte du neutrino.

♣ Remarque

Dans les collisions entre billes, la force est en $d^{3/2}$, où d est la longueur d'interpénétration des deux billes. On a ainsi un phénomène de propagation d'une onde soliton dans le pendule.

♣ Bonus : mise en équation de l'expérience du tabouret

Cette mise en équation n'est pas particulièrement compliquée, mais il faut être très rigoureux car il est très facile de dire des choses peu claires, voire fausses.



Soit Oz l'axe de rotation du tabouret. On définit $\vec{\Omega} = \Omega \vec{e}_z$ le vecteur rotation du système {tabouret + expérimentateur}, de moment d'inertie J_{tab} et $\vec{\omega}$ le vecteur rotation de la roue, de moment d'inertie J_{roue} .

La roue est mise en rotation selon une direction orthogonale à Oz , puis on place son axe de rotation selon Oz . On observe alors que le tabouret se met à tourner, et que le sens de rotation change lorsque l'on retourne la roue.

On applique le TMC par rapport à l'axe Oz au système {tabouret + expérimentateur + roue}, dans le référentiel terrestre pris galiléen. Il n'est soumis qu'à son propre poids \vec{P} et à la réaction du sol \vec{R}

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z(\vec{P}) + M_z(\vec{R}) = 0 + 0$$

d'où : $L_z = \text{cte} = J_{\text{roue}}\omega_z + J_{\text{tab}}\Omega_z$

Or avant d'avoir mis la roue à la verticale $\omega_z = 0$ et $\Omega_z = 0$. Ainsi, une fois la roue correctement placée, les vitesses de rotation vérifient :

$$J_{\text{roue}}\omega_z + J_{\text{tab}}\Omega_z = 0 \quad \Rightarrow \quad \Omega_z = -\frac{J_{\text{roue}}}{J_{\text{tab}}}\omega_z$$

LP06 : Principes de la cinématique relativiste. Conséquences.

♣ Bibliographie

[14] *Mécanique 1*, B.F.R. : excellent sur le sujet

[120] *Relativité et invariance*, J.P. Pérez : attention aux trucs pas clairs

[135] *Relativité restreinte*, C. Semay

♣ Pré-requis

Électromagnétisme

Mécanique classique

Interférences

♣ Idées à faire passer

Insuffisance de la théorie classique à expliquer certaines expériences

Démarche de construction de la relativité

C'est contre-intuitif ... et pourtant ça marche!

♣ Plan

Introduction

Problème de l'électromagnétisme par rapport à la mécanique classique.

1. Insuffisance de la théorie classique [14]

1.1. Transformation de Galilée

Position du problème : deux référentiels \mathcal{R} et \mathcal{R}' . Notion d'événement. Hypothèse de temps absolu.

Transformation de Galilée, principe de relativité restreinte.

1.2. Incompatibilité entre la relativité galiléenne et les équations de Maxwell

Maxwell non covariant sous Galilée + pb du référentiel de définition de c

[120] On peut faire la démo et la projeter sur transparent.

1.3. Expérience de Michelson et Morley

Confirmation du problème, nécessité de changer la loi de transformation.

2. Fondements de la relativité restreinte [14]

2.1. Postulats

Principe de relativité, invariance de c , espace homogène isotrope. On doit retrouver la méca classique.

2.2. Transformation de Lorentz

La donner, définir β et γ . Cas des faibles vitesses.

2.3. Transformation des vitesses

La donner et la commenter.

[14, 135, 120] Application à l'expérience de Fizeau. Utiliser le BFR pour le schéma et les notations, et le Semay pour les résultats.

3. Conséquences [14]

3.1. Perte de la simultanéité

3.2. Dilatation du temps

Mentionner la réciprocité. Application aux muons.

3.3. Contraction des longueurs

Mentionner la réciprocité.

3.4. Invariance de l'intervalle

À faire si le temps. Définir le cône de lumière, et les événements pouvant être liés causalement ou non.

Conclusion

Vers la dynamique

♣ Remarque

Le passage à la limite classique de la transformation de Lorentz est (bizarrement !) non trivial. Pour aboutir à l'égalité $t' = t$ au premier ordre, il faut supposer une limite doublement classique : non seulement les référentiels sont en translation à vitesse $v_e \ll c$, mais il faut aussi ajouter qu'on s'intéresse à des particules se déplaçant à des vitesses non relativistes. Ainsi le long d'une trajectoire $x = vt \ll ct$.

LP07 : Dynamique relativiste. Exemples.

♣ Bibliographie

[14] *Mécanique 1*, B.F.R.

[29] *Physique atomique*, B. Cagnac : très clair sur l'effet Compton

[120] *Relativité et invariance*, J.P. Pérez : vainqueur par KO du concours de notation la plus pourrie

♣ Pré-requis

Cinématique relativiste

Formalisme des quadrivecteurs

Électromagnétisme classique

♣ Idées à faire passer

Équivalence masse-énergie, on peut récupérer l'énergie de masse sous une autre forme

Intérêt de la notion de quadrivecteur

Généralisation des résultats de mécanique classique

♣ Plan

Introduction

Passage de la cinématique à la dynamique

1. Principes de la dynamique relativiste [14, 120]

1.1. Quadrivecteur énergie-impulsion

Construction du quadri-vecteur vitesse, du quadri-vecteur énergie-impulsion, sans préciser vraiment la nature de la composante temporelle.

1.2. Principe fondamental de la dynamique

Poser la quadri-force. Interpréter alors l'énergie à partir de conservation de norme de quadri-vecteur.

1.3. Énergie

Energie de masse, énergie cinétique, relation d'Einstein.

2. Collisions

Faire un des deux calculs en entier, être beaucoup plus rapide sur l'autre.

2.1. Effet Compton

[29] Diffusion élastique photon électron.

2.2. Énergie de seuil d'une réaction

[120, 14] Commenter : le réservoir d'énergie cinétique est l'énergie de masse. Bien discuter le passage au centre de masse. Bien dégager l'intérêt du référentiel barycentrique.

3. Mouvement des particules chargées

3.1. Particule dans un champ électrique

[14] Résoudre l'équation du mouvement, arriver à la loi $v(t)$. Application à l'expérience de Bertozzi.

3.2. Particule dans un champ magnétique

[14] S'arrêter à l'équation de précession, et dire que c'est exactement comme en classique avec m remplacé par γm .

3.3. Application aux accélérateurs

[14, 120] Montrer les images du CERN du CD.

Conclusion

Ouvrir sur la production de nouvelles particules par collision

♣ Remarques

- ▷ Le plan peut largement être modulé en fct des envies du jour J, les parties 2 et 3 sont complètement inversables.
- ▷ Il faut faire proprement un calcul, mais pas se noyer. Le calcul détaillé d'énergie de seuil est intéressant en soi, mais fastidieux.
- ▷ Cette leçon a été testée, c'est un sprint long.

LP08 : Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux, nombre de Reynolds. Exemples simples.

♣ Bibliographie

[84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : bien veiller à prendre l'édition récente (verte, et pas rouge)

[110] Tec&Doc PC-PC*, S. Olivier

[129] Cap Prépa PC-PC* ou PSI-PSI*, V. Renvoizé : très bon cours de mécanique des fluides

♣ Pré-requis

Hydrostatique

Notion de diffusion/convection

Cinématique des fluides

Théorie cinétique des gaz

♣ Idées à faire passer

Origine physique de la viscosité

Caractère diffusif, donc dissipatif

Importance du Reynolds pour classer les écoulements

♣ Plan

Introduction

Intuiter la notion de viscosité

1. Notion de viscosité

1.1. Force surfacique de viscosité

[110] ♣ **Manip** : viscosimètre de Couette avec glycérol coloré. Il y a un dispositif à Cachan.

La force de pression ne peut pas expliquer la mise en mouvement du fluide. Définition de la contrainte tangentielle visqueuse. ODG de η .

1.2. Modélisation microscopique

[84] Cas des gaz. Interpréter comme un phénomène de diffusion de quantité de mouvement.

1.3. Facteurs influant sur la viscosité

[84] Influence de T , cas des fluides non-newtoniens.

2. Dynamique des écoulements visqueux [129]

2.1. Résultante volumique des forces de viscosité

Faire le calcul.

2.2. Équation de Navier-Stokes

Navier-Stokes + C.L. à justifier.

2.3. Nombre de Reynolds

Définir Re . Types d'écoulements en fonction de Re .

3. Exemples d'écoulements visqueux [129]

3.1. Écoulement de Couette plan

Géométrie du problème et conditions aux limites

Régime transitoire : équation de diffusion. Mise en mouvement progressive des couches de fluide de proche en proche. Régime stationnaire.

[à savoir] cf. bonus. Bilan de puissance : il y a dissipation d'énergie par viscosité.

3.2. Écoulement de Poiseuille (selon le temps)

Poser la géométrie, les C.L., écrire Navier-Stokes.

Donner le résultat : profil parabolique et débit. Application au viscosimètre de Poiseuille.

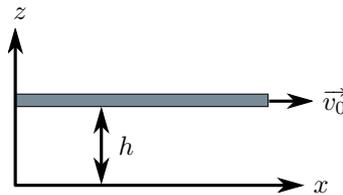
O.D.G. : exo corrigé château d'eau.

Conclusion

Couche limite

♣ Bonus : bilan de puissance de l'écoulement de Couette plan

L'objectif est de montrer dans le cas de l'écoulement de Couette plan que la puissance exercée par l'opérateur extérieur sur la plaque supérieure n'est pas transmise par le fluide à la plaque inférieure. On montre ainsi le caractère dissipatif de la viscosité. Je n'ai trouvé cette démonstration dans aucun livre, seulement dans mon cours de PC*.



On note Σ la surface de la plaque. Dans le fluide, la résolution de l'équation de Navier-Stokes conduit au champ de vitesse :

$$\vec{v}(z) = \frac{v_0}{h} z \vec{e}_x$$

Force et puissance exercées par le fluide sur la plaque inférieure ($z = 0$) :

$$\vec{F} = \eta \left. \frac{\partial v_x}{\partial z} \right|_{z=0} \Sigma \vec{e}_x = \eta \frac{v_0}{h} \Sigma \vec{e}_x \quad \Rightarrow \quad \mathcal{P} = \vec{F} \cdot \vec{v}(0) = 0$$

Force exercée par le fluide sur la plaque supérieure ($z = h$) :

$$\vec{F}' = -\eta \left. \frac{\partial v_x}{\partial z} \right|_{z=h} \Sigma \vec{e}_x = -\eta \frac{v_0}{h} \Sigma \vec{e}_x$$

On en déduit la force \vec{F}_{op} exercée par l'opérateur sur la plaque pour la maintenir en mouvement de translation rectiligne et uniforme : $\vec{F}_{\text{op}} = -\vec{F}'$. Ainsi la puissance fournie par l'opérateur s'écrit :

$$\mathcal{P}_{\text{op}} = \vec{F}_{\text{op}} \cdot \vec{v}_0 = \eta \frac{v_0^2}{h} \Sigma > 0$$

Conclusion : le fluide n'a pas transmis à la plaque inférieure la puissance fournie par l'opérateur. Il y a eu dissipation d'énergie par viscosité.

LP09 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide ; validité. Relation de Bernoulli ; limites et applications.

♣ Bibliographie

[63] *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*, J.P. Faroux et J. Renault

[129] Cap prépa PC-PC* ou PSI-PSI*, V. Renvoizé : très bon en mécanique des fluides

[132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Cinématique des fluides

Équation de Navier-Stokes

Notion de viscosité

Nombre de Reynolds

♣ Idées à faire passer

On peut simplifier un problème d'hydro

La viscosité est indispensable pour tout décrire, mais elle s'exerce sur des domaines qui peuvent être limités

Beaucoup de situations pratiques se décrivent avec des écoulements parfaits.

♣ Plan

Introduction

Équation de Navier-Stokes impossible à résoudre en toute généralité

1. Écoulement parfait d'un fluide [129]

1.1. Écoulement parfait et fluide parfait

[à savoir] Fluide parfait : rigoureusement sans viscosité. Écoulement parfait : phénomènes diffusifs négligeables. Interprétation avec le nombre de Reynolds comme rapport des temps caractéristiques de diffusion et convection.

1.2. Équation d'Euler et conditions aux limites

Simplifier Navier-Stokes. Décompte des inconnues et des équations.

Condition aux limites sur la composante normale.

Condition aux limites pour la composante tangentielle : notion de couche limite. O.D.G. des dimensions de couches limites. « Écoulement parfait » signifie que l'on néglige la taille de la couche limite devant les autres dimensions du problème.

2. Relations de Bernoulli [129]

2.1. Démonstration

Bien poser les hypothèses, se placer directement en régime permanent. Traiter les deux cas irrotationnel et projeté sur une ligne de courant.

2.2. Interprétation énergétique

[132, 63] Bilan d'énergie : la puissance des forces intérieures est nulle. Pas de transfert thermique.

3. Applications [129, 132]

3.1. Effet Venturi

Appliquer Bernoulli. ODG. ☞ **Manip** : mettre un capteur de pression sur une trompe à eau pour Büchner

3.2. Tube de Pitot

Application aux avions.

3.3. Effet Coanda

Interpréter avec Bernoulli, puis avec l'équation d'Euler. ☞ **Manip** : balle de ping-pong dans un jet de sèche-cheveu.

3.4. Paradoxe de d'Alembert

Paradoxe : la force de traînée serait nulle s'il n'y avait pas de couche limite.

Conclusion

Force de traînée/turbulence/profilage d'objets ...

LP10 : Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides : applications.

♣ Bibliographie

[38] *Gouttes, bulles perles et ondes*, P.G. de Gennes

[43] *Thermodynamique*, B. Diu

[84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : *a priori* l'ancienne édition ne contient pas tout.

[91] BUP 649, *Propagation des ondes : vitesse de phase, vitesse de groupe*, B. Lahaye, 1982 : très belle discussion sur les ondes de surface

♣ Pré-requis

Thermodynamique

Mécanique des fluides

♣ Idées à faire passer

Existence de l'énergie de surface et force associée

Origine microscopique et ODG associés

Compétition avec la gravité

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : verre d'eau qui déborde un peu. Importance des effets de surface.

1. Tension superficielle

1.1. Définition

☞ **Manip** : mise en évidence avec la barre où il faut tirer.

[43] Définition en termes de travail à fournir pour une transformation réversible. ODG, en $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$.

1.2. Interprétation microscopique

[38] En déduire une interprétation des ODG.

☞ **Attention** : prendre T_{vap} et pas T_{amb} comme température typique, sinon ça laisse entendre que γ augmente avec T , ce qui est faux.

☞ **Attention** : ne pas dessiner de flèches sur les dessins, sinon ça laisse entendre que la force de tension superficielle est orthogonale à la surface, alors qu'elle est tangente à la surface.

1.3. Forces de tension superficielle

Commencer par faire apparaître la force dimensionnellement. Interprétation du travail avec la force.

1.4. Mesure de tension de surface

[84] ☞ **Manip** : méthode de l'anneau de Gouy. Mentionner les surfactants qui abaissent γ , et les ions qui augmentent γ .

2. Interface entre deux fluides

2.1. Loi de Laplace

[43] Démontrer avec le potentiel thermo pour une goutte sphérique. Généraliser.

2.2. Instabilité de Rayleigh-Taylor

[84] Plus ou moins qualitatif. Faire apparaître la longueur capillaire et l'interpréter.

☞ **Manip** : avec un verre, qui se vide, et avec une cuve de spectrophotométrie (ou un tube à hémolyse), qui ne se vide pas. Interprétation : la plus petite longueur d'onde instable est déjà plus grande que le tube, l'instabilité ne peut donc pas se développer.

2.3. Ondes de surface

[84, 91] Origine physique, différents régimes (relation de dispersion).

3. Contact à trois phases

3.1. Loi d'Young

Définir la ligne triple. Démonstration de la loi d'Young à partir de l'énergie. ☞ **Attention** : il y a une erreur dans le de Gennes, où il manque un L dans l'expression de δW .

Mouillage partiel/mouillage total.

[38] ☞ **Manip** : adhésion capillaire, à bien discuter.

3.2. Loi de Jurin

[84] Ascension capillaire. Hystérésis des angles de contact.

3.3. Forme des gouttes

[38] Compétition tension de surface/gravité, longueur capillaire. Montrer des photos du CD.

Conclusion

Phénomènes de petites échelles, importance.

LP11 : Modèle du gaz parfait.

♣ Bibliographie

- [13] *Thermodynamique*, BFR : détaille tous les calculs de théorie cinétique, bon à lire pour information
- [42] *Physique statistique*, B. Diu
- [81] Tec&Doc PCSI, P. Gréacias : le livre de base de la leçon
- [118] *Thermodynamique*, J.P. Pérez

♣ Pré-requis

Bases de thermodynamique

♣ Idées à faire passer

Démarche de construction du modèle

Ordres de grandeur

♣ Plan

Introduction

On a défini T , P , U de façon macro et là on va essayer d'en donner une interprétation micro.

1. Résultats expérimentaux et modélisation

1.1. Comportement macroscopique des gaz

[81] Lois de Boyle-Mariotte, Joule-Gay Lussac et Avogadro-Ampère. Définition de la température absolue et équation d'état. Lois de Joule. Résultats expérimentaux de capacités calorifiques.

1.2. Modèle du gaz parfait

[81, 118] Molécules = particules classiques (par opposition à quantique), de dimension négligeable devant la distance intermolécules, interaction par contact entre molécules et par contact avec les parois assurant la thermalisation.

Il est important d'opposer les hypothèses du modèle du GP et celles de la théorie cinétique, qui est l'outil d'étude du modèle.

2. Étude en théorie cinétique

2.1. Hypothèses

[81] Densité uniforme, distribution stationnaire, homogène, isotrope.

2.2. Loi de distribution des vitesses

[13] Postulée. Définir vitesse moyenne et vitesse quadratique moyenne.

2.3. Pression cinétique

[42] p. 359. Intégrale de mv_z par la distribution gaussienne de proba

2.4. Équation d'état

[81] Retrouver l'équation d'état, identifier température cinétique et température absolue.

3. Énergie interne

3.1. Gaz parfait monoatomique

$U = \langle E_c \rangle$ et C_V .

3.2. Théorème d'équipartition de l'énergie

[81] Le faire constater sur le cas du GPM, et généraliser. Attention aux hypothèses.

3.3. Gaz parfait polyatomique

[81] U et C_V . Faire constater les températures caractéristiques et le gel de degrés de liberté.

4. Limites du modèle

4.1. Gaz de Van der Waals

Le GP ne subit jamais de transition de phase (calcul de χ_T éventuellement) : normal, pas d'interactions

[81] Nature des forces, équation d'état, interprétation de a et b

4.2. Effets quantiques

[118, 42] Définir la longueur d'onde de de Broglie naturellement, calcul pour un vrai gaz et pour un gaz d'électrons. Mais le gaz d'électrons reste parfait (i.e. sans interactions), il est juste quantique.

Conclusion

Modèle simple, mais dont la portée est assez vaste. Faire ressortir la démarche de construction.

♣ Remarque

Faire l'effort de donner des ODG tout le temps, et c'est en particulier crucial pour discuter les hypothèses du modèle.

LP12 : Fonctions d'état caractéristiques d'un système à l'équilibre thermodynamique. Identités thermodynamiques. Applications.

♣ Bibliographie

[13] *Thermodynamique*, BFR : pour un exemple

[31] Précis Bréal *Thermodynamique PC-PSI*, N. Choimet : de très loin le plus clair sur le sujet !

[43] *Thermodynamique*, B. Diu : n'apparaît pas explicitement dans la leçon, mais je pense qu'il faut le regarder quand même.

[115] *La physique par la pratique*, B. Portelli : également pour un exemple

♣ Pré-requis

Notion de fonction d'état

Les deux principes de la thermodynamique

♣ Idées à faire passer

Toute l'info sur le système est contenue dans des fonctions caractéristiques ou de façon équivalente dans l'équation d'état et la dépendance d'une capacité thermique avec T

Une fonction caractéristique est exprimée dans des variables naturelles, celles de l'identité thermodynamique

Même si elle ne sont pas connues *a priori*, l'existence de ces fonctions impose des contraintes sur les coefficients de réponse

♣ Plan

Introduction

Rappeler ce qu'est l'équilibre ... sans être trop catégorique car ce n'est pas évident à définir

1. Caractérisation d'un système thermodynamique à l'équilibre

1.1. Coefficients de réponse

Problématique : comment caractériser un système si on n'a pas de modèle micro ?

[31] en adaptant l'enrobage. Coefficient de réponse : on fait varier un paramètre, on regarde comment les autres s'ajustent en conséquence. Insister sur la mesurabilité.

Définir les plus courants sur transparent

1.2. Les outils de la thermodynamique

Identité thermodynamique dU , démontrée avec les $x_i dX_i$, et généreusement commentée

1.3. Notion de fonction caractéristique

Poser le problème : on veut une fonction qui contienne tous les coefficients de réponse et l'équation d'état.

[31] Exemple du gaz parfait. Construction de $S(U, V)$, on montre qu'on retrouve tout ce qu'on a mis. Généralisation : $S(U, V)$ est toujours une fonction caractéristique.

2. Les fonctions caractéristiques [31]

2.1. Variables naturelles

On poursuit l'exemple du gaz parfait en écrivant $S(T, V)$, qui n'est pas une fonction caractéristique. Changer de variable naturelle ne se fait pas n'importe comment, il faut prendre la variable conjuguée et changer de fonction caractéristique.

2.2. Exemple de l'énergie libre

Construction et définition, différentielle, l'interpréter comme une réécriture de l'identité thermo

2.3. D'autres variables, d'autres fonctions caractéristiques

Présenter sur un transparent $G(T, P)$ et $H(S, P)$

3. Relations entre coefficients de réponse

3.1. Relations de Maxwell

[31] Théorème de Schwarz, et en énoncer une. Contrainte sur un modèle microscopique.

3.2. Exemple : traction d'un fil métallique

[13] p. 241. Faire le calcul, on peut montrer la manip du fer pour visualiser le signe de λ , et conclure.

3.3. Exemple : désaimantation adiabatique

[115] Faire le calcul, expliquer, parler de l'intérêt pratique. On peut ensuite retrouver la dépendance de l'entropie par un argument dimensionnel, et montrer que tout est cohérent.

Conclusion

La thermo est phénoménologique, il manque encore des modèles microscopiques pour les fonctions caractéristiques, que fournira la physique statistique

LP13 : Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques. Exemples.

♣ Bibliographie

Les trois livres de prépa se complètent utilement.

[31] Précis Bréal *Thermodynamique PC-PSI*, N. Choimet

[43] *Thermodynamique*, B. Diu : piégeux car présente les choses avec une vision différente, mais il est nécessaire pour l'exemple de la nucléation

[110] Tec&Doc PC-PC*, S. Olivier

[132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Principes de la thermodynamique

Machines thermiques

Fonctions caractéristiques

♣ Idées à faire passer

Objectif des potentiels : reformulation pratique des principes, pour prédire l'évolution et étudier l'équilibre

Universalité de la méthode

Un potentiel dépend des conditions extérieures et n'est pas une fonction d'état

♣ Plan

Introduction

[132] Insister un peu sur l'énergie potentielle méca. On se restreint aux systèmes fermés.

1. Notion de potentiel thermodynamique

1.1. Variable interne et paramètre de contrôle

[31] Être bref, donner un exemple

1.2. Cas d'un système isolé

[31] Deux sous-systèmes avec échange de chaleur. On applique le second principe.

1.3. Définition et généralisation

[132] Idée : formulation « pratique » des principes. Définition.

Insister sur la généralité de la chose, dire qu'ensuite on considère deux cas particuliers très courants.

2. Système au contact d'un thermostat

2.1. Construction du potentiel thermodynamique adéquat

[132] surtout, [110, 31] pour remarques. Construction de F^* . S'arrêter au cas $W = 0$.

2.2. Exemple de recherche de l'état d'équilibre

[132] Exemple du morceau de fer jeté dans un lac

2.3. Travail maximum récupérable

Finir le calcul dans le cas W non nul, en insistant bien sur le fait qu'alors F^* n'est plus le potentiel thermodynamique (il peut croître au cours d'une évolution si on fournit du travail au système). Mentionner que ça marche pour tout potentiel thermo.

[132] Exemple de la bouteille d'air comprimé. Utiliser un transparent !

2.4. Condition de stabilité

[43] p. 196. $C_V > 0$. Mentionner que tout potentiel thermo conduit à des inégalités semblables pour les coefficients calorimétriques.

3. Système au contact d'un thermostat et d'une source de pression

3.1. Potentiel thermodynamique adéquat

[132] Repartir de F^* . Une fois qu'on a G^* , faire la totale sans démo : potentiel thermo, travail max récupérable, et condition de stabilité.

3.2. Application à la loi de Laplace

[43, 132] Établir la loi de Laplace pour une goutte sphérique, éventuellement généraliser

3.3. Application à la nucléation

[43, 31] Être qualitatif, parce que le calcul est long et requiert pas mal d'hypothèses. Déjà en expliquant bien la physique ça prendra un certain temps !

♣ Remarques

- ▷ Il faut être très rigoureux sur les variables, et bien préciser à chaque fois les hypothèses faites sur le système.
- ▷ Bien exprimer les conditions sur les différentielles et pas les variations : c'est beaucoup plus contraignant, car cela vaut tout au long de la transformation et pas seulement dans les états initial et final.
- ▷ Un autre plan possible serait de regrouper les définitions de F^* et G^* en 2., et les applications en 3. Je préfère ce plan car il limite les risques d'être flou sur la définition des variables internes et des paramètres extérieurs.
- ▷ Ce plan a été présenté en oral blanc, et il est très bien passé à la fois du point de vue de la longueur et des commentaires du correcteur.

LP14 : Thermodynamique des phénomènes irréversibles.

♣ Bibliographie

- [72] *Les 1001 questions de la physique en prépa, PC-PC**, C. Garing
 [92] *Leçons de thermodynamique*, B. Latour : ne surtout pas suivre ses calculs qui sont au mieux très mal posés, et au pire faux, mais par contre il met bien en avant les idées importantes
 [111] *Thermodynamique*, H. Gié
 [115] *La physique par la pratique*, B. Portelli
 [116] Cap Prépa Sup, J. Pérez

♣ Pré-requis

Les principes de la thermodynamique
 Expressions de l'énergie et de l'entropie de systèmes simples : GP, solide

♣ Idées à faire passer

L'irréversibilité est reliée au second principe, réversibilité est un cas limite idéal
 À l'échelle micro les processus sont réversibles, l'irréversibilité vient de lois phénoménologiques
 Liste des causes d'irréversibilité

♣ Plan

Introduction

Les équations de la mécanique/les équations microscopiques sont réversibles. Il faut imposer la thermodynamique et le second principe pour décrire l'irréversibilité.

1. Critère d'irréversibilité

1.1. Évolution réversible et irréversible

[111] Définition intuitive de la réversibilité.

1.2. Second principe

[111] p. 187. Rappeler le second principe pour un système fermé : sens d'évolution. On définit l'entropie créée comme variation d'entropie d'un système fermé calorifugé. Dédire le critère de réversibilité.

1.3. Exemple : détente de Joule-Gay Lussac

[111] p. 146 et 201. Présenter le dispositif pour un GP, à vendre en tant que système modèle.
 Appliquer les deux principes ($T = \text{cte}$, bilan d'entropie).

2. Causes d'irréversibilité

2.1. Inhomogénéité de grandeurs intensives

[72] Diffusion thermique dans une barre calorifugée entre deux thermostats.
 Étude globale : établir l'équation de diffusion, non t -renversible donc irréversible a priori.
 Bilan d'entropie global : l'entropie se crée dans la barre, là où est le gradient.
 Bilan d'entropie local : en déduire le signe de la conductivité thermique λ , coefficient phénoménologique.

2.2. Frottement solide

[115] p. 148. Les frottements créent de l'entropie. On peut remonter au signe de μ , coeff phénoménologique.

2.3. Autres causes d'irréversibilité

[92, 116] Hystérésis et réaction chimique.

3. Approche de la réversibilité

3.1. Thermalisation

[111] p. 206. Contact avec un, deux, puis N thermostats. Réversibilité à la limite : cas limite idéal.

3.2. Détente de Joule-Gay Lussac quasi-statique

[111] p. 212. Transformation fondamentalement irréversible.
 [à savoir] Conclure que ça n'a rien d'étonnant puisque l'entropie est une fonction d'état. Comme on part et arrive dans les mêmes états, et que le système ne peut pas échanger d'entropie avec qui que ce soit, alors la variation d'entropie et donc l'entropie créée est la même que l'évolution soit quasi-statique ou non.

3.3. Quasistaticité et réversibilité

[92] Réversibilité \Rightarrow quasi-staticité, mais la réciproque n'est pas vraie : la création d'entropie dans l'étape infinitésimale doit être d'ordre 2.

Conclusion

Interprétation statistique de l'entropie et du second ppe [111]

♣ Remarques

- ▷ Attention à ne pas dire de bêtises dans les raisonnements sur les coefficients phénoménologiques : p.ex. pour la loi de Fourier $\vec{j} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$ la bonne façon de raisonner est de dire « comme $S_{\text{créé}} > 0$, alors on doit avoir $\lambda > 0$ » et pas « comme $\lambda > 0$, alors $S_{\text{créé}} > 0$ donc tout va bien ». En effet, λ est un coefficient phénoménologique, donc la seule façon de le connaître sur un nouveau système est de le mesurer. Il n'y a aucune contrainte *a priori*. Lorsqu'on dit « il est évident que » l'échange de chaleur ne peut se faire que du chaud vers le froid, on ne fait que traduire notre intuition du second principe, mais il n'y a rien d'évident.
- ▷ J'ai testé cette leçon, elle est d'une longueur correcte.

LP15 : Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.

♣ Bibliographie

- [13] *Thermodynamique*, B.F.R. : pour quelques ODG
- [73] *1001 questions de physique en prépa, PCSI*, C. Garing : des discussions intéressantes mais pas cruciales
- [81] Tec&Doc PCSI, P. Grécias : avec le Gié, contient tout ce qu'il faut
- [92] *Leçons de thermodynamique*, B. Latour : pour les ODG
- [101] BUP 832, *Le réfrigérateur*, F. Martin, mars 2001 : tout le détail sur le frigo
- [111] *Thermodynamique*, H. Gié : avec le Tec&Doc, contient tout ce qu'il faut
- [116] Cap Prépa Sup, J. Pérez
- [127] *La physique par les objets quotidiens*, C. Ray : pour une présentation qualitative du frigo

♣ Pré-requis

Les principes de la thermo
Transitions de phase

♣ Idées à faire passer

La thermo c'est utile!
Cas limite des transformations réversibles : ce n'est finalement pas le graal absolu

♣ Plan

Introduction

Histoire de la thermo : motivée par les machines thermiques et « la puissance motrice du feu ».

1. Machines thermiques

1.1. Définitions

[81] Machine thermique, moteur/récepteur.

1.2. Machines monothermes

[81, 111] Impossibilité d'un moteur monotherme.

1.3. Machines dithermes

[81, 111] Inégalité de Carnot-Clausius et diagramme de Raveau. Distinguer moteurs/récepteurs.

2. Moteurs dithermes

Mettre des O.D.G. partout [92, 13, 73]!

2.1. Efficacité

[81] Définir l'efficacité. Établir le théorème de Carnot.

2.2. Puissance

[116] Montrer que l'aire du cycle est le travail fourni sur un cycle. Discuter soigneusement du sens de parcours
[73] Compromis puissance/efficacité.

3. Réfrigérateur à compresseur [101]

3.1. Présentation

[127] Schéma, utilité des différents éléments, choix du fluide frigorigène, intérêt des changements d'état
Donner les valeurs de chaleur latente du vrai fluide frigorigène, qui s'obtient par la lecture du diagramme de Mollier inclus dans le BUP.

3.2. Cycle thermodynamique

Décrire le cycle. Justifier les hypothèses faites à l'aide d'ODG.

3.3. Bilan énergétique

Calcul de l'efficacité. Si temps (ce qui semble improbable) : démontrer le théorème de Carnot pour le frigo.

Conclusion

Lien entre l'approche théorique de la thermo et ses applications industrielles.

LP16 : Étude thermodynamique d'un système constitué par un corps pur sous plusieurs phases. Exemples.

♣ Bibliographie

- [13] *Thermodynamique*, B.F.R. : peu utile, une application
- [18] H-Prépa *Thermodynamique 1ère année*, J.M. Brébec : peu utile, rappel définitions sup
- [20] H-Prépa *Thermodynamique 2ème année PC-PSI-PT*, J.M. Brébec : peu utile, une application
- [31] Précis Bréal *Thermodynamique PC-PSI*, N. Choimet : encore une fois très clair
- [43] *Thermodynamique*, B. Diu
- [92] *Leçons de thermodynamique*, B. Latour : surtout pour les ODG

♣ Pré-requis

Potentiels thermo
Fonctions caractéristiques
Lecture des diagrammes de phase
Tension de surface

♣ Idées à faire passer

L'étude des transitions de phase se base sur les potentiels thermodynamiques
Une transition de phase est associée à des discontinuités de grandeurs thermodynamiques
Notion de chaleur latente pour les transitions d'ordre 1 et ODG associés

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : au choix, surfusion de l'eau ou recalescence du fer.

1. Evolution et équilibre d'un corps pur sous deux phases

1.1. Choix du potentiel thermodynamique

[31] Description du système : variables externes, variables internes. Choix du potentiel thermo.

1.2. Condition d'évolution ou d'équilibre

[31] Exprimer le potentiel, trouver le sens d'évolution, puis la condition d'équilibre. Interpréter la transition en terme de compétition énergie-entropie

[43] Justifier l'existence des courbes d'équilibre du diagramme (P, T)

[31] Application à l'équilibre liquide-vapeur

1.3. Enthalpie de changement d'état

[18] Définir, interprétation en transfert thermique, lien à la variation d'entropie.

[92] Donner des ODG : c'est beaucoup !

2. Interprétation des diagrammes de phase

2.1. Formule de Clapeyron

[31] Démonstration

[92] ODG de la température d'ébullition de l'eau au sommet du Mont Blanc

2.2. Diagramme (P, T)

[31] Interpréter le signe des pentes. S'intéresser au cas de l'eau. Mentionner l'expérience du regel.

[20, 92] Application à la lyophilisation.

2.3. Diagramme (P, V)

On passe de l'un à l'autre par application de l'équation d'état. Commentaire sur le signe de χ_T

[13] Application au stockage des fluides

3. Nucléation

3.1. Observations expérimentales

[à savoir] ☞ **Manip** : surfusion de l'eau. Expliquer qualitativement.

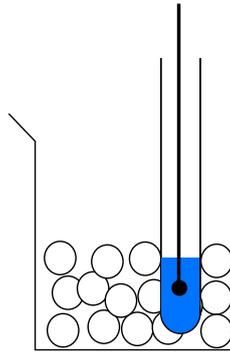
3.2. Prise en compte des effets de surface

[43] Si on est à la bourre, juste donner la formule et interpréter

Conclusion

Ouvrir sur les machines thermiques, et sur la possibilité de transitions du second ordre (au hasard ferro-para)

♣ Bonus : expérience de surfusion de l'eau



Durée de l'expérience : 5 à 10 minutes.

Placer un mélange glace + gros sel dans un bécher. Mélanger, et attendre quelques minutes : la température du mélange atteint très facilement -15°C .

Placer dans le bécher un tube à essais contenant de l'eau, et suivre la température au cours du temps.

On observe que la température diminue et devient négative alors que l'eau dans le tube est toujours liquide : c'est le phénomène de surfusion. On peut descendre au moins jusqu'à -5 à -8°C . Si on donne un pichenette dans le tube à essais, l'eau solidifie, ce qui ramène la température à 0°C pendant la durée de coexistence des deux phases. Une fois la phase liquide disparue la température recommence à diminuer.

LP17 : Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples.

♣ Bibliographie

- [34] *Thermodynamique et physique statistique*, C. Coulomb : des choses bien, mais assez soft
 [42] *Physique statistique*, B. Diu : très (trop) complet
 [81] Tec&Doc PCSI, P. Grélias
 [92] *Leçons de thermodynamique*, B. Latour : comme souvent les calculs sont mal posés, mais les idées importantes bien dégagées

♣ Pré-requis

Thermodynamique
 Probabilités
 Bases de mécanique quantique

♣ Idées à faire passer

L'entropie a une interprétation physique probabiliste
 La thermodynamique retrouve sa place comme outil de description de l'état le plus probable

♣ Plan

Introduction

On peut interpréter facilement T ou U . Quid de S ?

1. Notion d'état microscopique [42, 92]

1.1. Etats microscopiques et macroscopiques

$N \gg 1$: description très compliquée, notion de macro-état/micro-état.
 Illustrer sur un ou deux exemples : gaz parfait classique et/ou cristal paramagnétique.

1.2. Moyennes et ergodicité

Définir les moyennes temporelles d'ensemble et la notion d'ensemble statistique. Principe d'ergodicité.

1.3. Limite thermodynamique

Fluctuations en $1/\sqrt{N}$
 Limite thermodynamique (N très grand) : le système ne s'écarte jamais notablement de l'état le plus probable.

2. Entropie statistique

2.1. Entropie de Shannon

[42] Définir et expliquer ses propriétés. Mesure la manque d'information sur le système.

2.2. Distribution microcanonique

Définir l'ensemble microcanonique : paramètres extérieurs et variables internes.
 Postulat fondamental.

2.3. Exemple : détente de Joule-Gay Lussac

[42, 34] Commenter l'expression l'entropie sur cet exemple : augmente lors de la transformation, extensivité (faible couplage)

[81] On retrouve le ΔS habituel de thermodynamique.

2.4. Température microcanonique

Définition. Contact thermique.

3. Exemple : cristal paramagnétique [42]

3.1. Calcul de l'entropie

Décompte des micro-états, en déduire S en fonction de B et E .

3.2. Aimantation

Calculer T et en inversant on obtient $\mathcal{M}(T)$.
 Si temps : remarque sur les températures négatives.

Conclusion

Ouverture vers le canonique, qui sort naturellement de l'exemple du 3.

♣ Remarques

- ▷ Toutes les notions de probabilité sont bien détaillées et bien définies dans un appendice à la fin du Diu.
- ▷ Cristal paramagnétique : E et B suffisent à en déduire \mathcal{M} qui n'est pas indépendant.

LP18 : Introduction au facteur de Boltzmann à partir d'un exemple au choix.

♣ Bibliographie

[34] *Physique statistique et thermodynamique*, C. Coulon

[42] *Physique statistique*, B. Diu

[81] Tec&Doc PCSI, P. Grécias

♣ Pré-requis

Ensemble microcanonique

Thermodynamique

Hydrostatique

Rudiments de magnétisme macroscopique

Fermions et bosons

♣ Idées à faire passer

Conditions d'application de la formule de Boltzmann

Caractère intrinsèquement différent des statistiques quantiques

♣ Plan

Introduction

Pour interpréter la thermo de façon microscopique, le microcanonique c'est pas pratique

1. Introduction au facteur de Boltzmann à partir de l'exemple au choix

1.1. Modèle d'atmosphère isotherme

[81] Calcul, hauteur caractéristique, ODG. Bien insister sur T uniforme.

1.2. Interprétation statistique

[81] Interpréter en termes de proba de présence pour une molécule, compétition pesanteur vs. thermique.

1.3. Généralisation

Donner divers exemples : électrolyte, conformères, sédimentation, orientation de cristaux liquides ...

Bien mettre en avant la condition de contact avec un thermostat

2. Ensemble canonique

2.1. Distribution canonique

[42] Proba d'un microétat (calcul à faire à partir du microcanonique), fonction de partition. Nombre d'occupation à définir et à calculer. Établir $\overline{E} = -\partial_{\beta} \ln Z$

Définir la notion d'ensemble statistique, et d'ensemble canonique

2.2. Premier exemple : cristal paramagnétique

[34] p. 157 à aménager. Partir du système de N spins et montrer la factorisation de Z , dire que c'est général pour les systèmes sans interaction. Calcul de l'aimantation moyenne.

2.3. Deuxième exemple : modèle d'Einstein d'un solide

[42] p. 378. Aller jusqu'au calcul de capacité calorifique, comparer aux résultats expérimentaux (image sur CD) : discuter les deux limites, expliquer le pb, lien modèle théorique et expérience

3. Théorème d'équipartition [42]

3.1. Énoncé et démonstration

Bien insister sur les hypothèses du théorème. Démo : les deux fonctions de l'intégration par partie sont x et $x e^{-\beta x^2}$.

3.2. Application : loi de Dulong-Petit

Retrouver rapidement le cas limite haute température

4. Statistiques quantiques [34]

4.1. Nécessité

Introduire la nécessité à partir du ppe de Pauli. Postuler les statistiques.

4.2. Du quantique au classique

Retrouver la limite classique et commenter sa validité

Conclusion

Bien réinsister sur le thermostat. Ouverture aux systèmes avec interactions.

♣ Remarques

- ▷ Il est essentiel de bien présenter les hypothèses dans cette leçon, en particulier le rôle du thermostat.
- ▷ J'ai testé cette leçon, et j'ai eu du mal à arriver au bout. Je pense qu'il faut présenter toutes les hypothèses et notations sur transparent, ce que je n'avais pas fait, mais aussi et surtout qu'il faut faire un vrai choix entre les paragraphes 3 et 4, mais je n'arrive pas à me déterminer sur lequel est le plus intéressant. Si j'avais eu à présenter cette leçon j'aurais sans doute laissé tomber l'équipartition et parlé un peu plus de statistiques quantiques.
- ▷ Globalement, je pense que cette leçon mériterait d'être largement retravaillée!

LP19 : Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Application aux transferts thermiques radiatifs.

♣ Bibliographie

- [19] H-Prépa *Thermodynamique MP*, J.M. Brébec : prendre la nouvelle édition
 [107] Tec&Doc MP-MP*, C. More : le livre de base de la leçon, à compléter avec les deux autres
 [111] *Thermodynamique*, H. Gié
 [126] Quaranta tome 2, *Thermodynamique*

♣ Pré-requis

Électromagnétisme
 Thermodynamique

♣ Idées à faire passer

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

♣ Plan

Introduction

Terre chauffée par le Soleil, forgeron : existence d'un transfert thermique radiatif

1. Bilans radiatifs

1.1. Interaction entre la matière et le rayonnement

Définir tous les flux. Cas limites des corps parfaitement transparent et opaque.

1.2. Equilibre radiatif et thermodynamique

Définition, bien opposer les deux.

Analogie avec le gaz parfait : la thermalisation se fait par contact avec les parois.

2. Rayonnement d'équilibre thermique

2.1. Loi de Planck

Énoncé avec $u_\nu(\nu)$ et $u_\lambda(\lambda)$, tracé. Commentaires : universalité, cas limites, nature quantique et statistique. Historique si motivé.

2.2. Loi de Stefan

La démontrer. Calcul de la densité de flux et le flux total.

2.3. Loi du déplacement de Wien

Donner sans démonstration, ça prendrait trop de temps.

Donner des ODG en prenant des précautions : les corps ne sont pas forcément à l'équilibre radiatif et thermodynamique. Ce qui amène naturellement au paragraphe 3.

3. Modèle du corps noir

3.1. Définition et réalisation pratique

3.2. Rayonnement du corps noir

Application au Soleil. Justifier *a posteriori* le calcul de température de surface. Mentionner les corps non-noirs qui rayonnent pareil avec un coefficient d'émissivité.

3.3. Pyromètre à disparition de filament

[19, 126] Expliquer le principe. ☞ **Manip** : si temps !

4. Application à l'effet de serre

[19] C'est un exercice résolu. On peut faire le calcul sans atmosphère, et donner le résultat avec. Il est complètement illusoire d'espérer faire le calcul avec atmosphère.

♣ Remarque

J'ai testé cette leçon. Je n'ai pas eu le temps de traiter l'effet de serre, ce qui ne me semble pas dramatique si on traite bien le cas du Soleil.

LP20 : Phénomènes de transport. Illustrations.

♣ Bibliographie

- [3] *Physique des solides*, N. Ashcroft
- [43] *Thermodynamique*, B. Diu
- [72] *Les 1001 questions de la physique en prépa PC-PC**, C. Garing
- [115] *La physique par la pratique*, B. Portelli
- [129] Cap Prépa PC-PC* ou PSI-PSI*, V. Renvoizé
- [132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Thermodynamique

♣ Idées à faire passer

Diversité des modes de transport

Phénomènes diffusifs : analogies, croissance en \sqrt{t} , origine microscopique

♣ Plan

Introduction

Phénomènes hors-équilibre pas décrits par la thermo à l'équilibre qu'on a étudié jusqu'à maintenant.

Préciser le parti pris de la LP : on se focalise sur le transport d'énergie thermique, et on mentionnera les autres grandeurs transportées à l'occasion.

1. Phénomènes de transport

1.1. Modes de transport

Exemple du transport d'énergie thermique au voisinage d'un feu de bois.

[72] Convection, diffusion, rayonnement. Distinguer convection naturelle et forcée.

§ **Manip** : convection dans le tube fait pour (avec sciure de bois)

1.2. Cadre d'étude : équilibre thermodynamique local

[43] Séparation des échelles de temps et de longueur : on doit pouvoir faire de la thermo!

1.3. Grandeurs conservées

[132] Définir \vec{j} et établir l'équation de conservation dans le cas de l'énergie thermique (1er ppe).

Généraliser : diffusion de particules, transport de charge électrique.

2. Un mode de transport : la diffusion

2.1. Loi de Fourier [3]

Énoncé de la loi de Fourier, à présenter comme un modèle à l'ordre 1.

Modèle microscopique dans les métaux. ODG de λ . Signe de λ en lien avec le 2nd principe. Lien avec le transport de charges et loi de Wiedeman-Franz.

§ **Manip** : conductiscope à cristaux liquides.

2.2. Équation de diffusion [132]

Établir alors l'équation de diffusion thermique à partir de l'équation de conservation.

Généralité de l'équation de diffusion. Transparent avec les analogies : particules, viscosité, effet de peau.

Commentaire : non-réversibilité, temps caractéristique, croissance en \sqrt{t} .

3. Application au vase Dewar [115]

3.1. Objectif d'un vase Dewar

Présenter la problématique du Dewar : on veut empêcher complètement les transferts thermiques avec l'extérieur. Pour empêcher la convection, on ferme le Dewar avec un couvercle.

3.2. Résistance thermique

[129] Définition. Analogies avec la résistance électrique. Association de résistances thermiques.

3.3. Prise en compte du rayonnement

Intérêt des faces argentées du Dewar. Pas forcément nécessaire de mener au bout tous les calculs du Portelli, puisqu'une autre leçon traite des transferts thermiques (LP19)

Conclusion

Applications industrielles : isolation des bâtiments, mais aussi diffusion des dopants dans les semi-conducteurs

LP21 : Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.

♣ Bibliographie

[26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders : se méfier de ses définitions qui sont celles des électrotechniciens et pas celles des physiciens

[133] Dunod PSI-PSI*, M.N. Sanz

[145] *Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques*, C.H. Vigouroux, BUP 846, juillet 2002 : très intéressant, car beaucoup d'ordres de grandeur et d'applications.

♣ Pré-requis

Induction électromagnétique

Forces de Laplace

♣ Idées à faire passer

Réversibilité de la conversion : on peut faire méca → élec, et élec → méca

Le rendement de la conversion est de 1, auquel s'ajoute les pertes

Importance industrielle

♣ Plan

Introduction

Centrales électriques : comment produire de l'électricité à partir d'un travail mécanique? Trains : et inversement ?

1. Principe de la conversion de puissance électromécanique

1.1. Exemple des rails de Laplace

[133], ch. induction. ✂ **Manip** : montrer la conversion dans les deux sens.

Établir les équations électrique et mécanique. Insister sur l'origine physique du couplage. Bilan de puissance sans considérer de pertes : rendement de la conversion = 1.

1.2. Conversion de puissance

[133], ch. conversion de puissance. Présenter complètement le bilan de puissance, en incluant les pertes.

2. Machine à courant continu

2.1. Structure

[133, 26] Montrer sur la MCC de démonstration et projeter image CD.

[à savoir] Passage des rails de Laplace à la MCC : rail tournant, champ radial, rotor/stator. Principe de fonctionnement, collecteur. Ligne neutre.

[145] Exemples d'utilisation.

2.2. Équations de fonctionnement

[26] Couple et f.e.m. d'induction. Réversibilité.

2.3. Étude en fonctionnement moteur

[26] Démarrage de la MCC. Point de fonctionnement. Bilan de puissance et rendement.

[145] O.D.G. Ajouter des O.D.G. de rendements typiques (0.8 à 0.9).

3. Machine à champ tournant

3.1. Production d'un champ magnétique tournant

[133] Principe : courants triphasés.

3.2. Machine synchrone

[133, 145] Principe, utilisations. Réversibilité. ODG. On peut éventuellement montrer expérimentalement avec les trois bobines, mais je doute qu'on ait le temps.

3.3. Machine asynchrone

[133, 145] Principe de fonctionnement, vitesse de glissement. ODG.

Conclusion

Utilisations du TGV à l'aspirateur.

♣ Remarques

- ▷ Conventions de signe à toujours préciser explicitement.
- ▷ Attention : en électrotechnique, « continu » signifie simplement « de signe constant », cf. Bréal.
- ▷ La leçon a été testée. Elle est vraiment très longue. En conséquence il faut aller très vite sur la première partie, ne pas trainer sur la deuxième, et garder du temps pour la troisième partie. Facile à dire quoi ... En tous cas, il ne faut pas hésiter à faire les schémas sur transparent, et ne pas être trop gourmand dans les calculs.

LP22 : Induction électromagnétique. Applications.

♣ Bibliographie

- [26] Précis Bréal, *Électrotechnique PSI*, P. Brenders
- [71] *Magnétisme : statique, induction et milieux*, C. Garing
- [72] *1001 questions de physique en prépa 2e année*, C. Garing
- [75] *Électromagnétisme 2e année*, H. Gié
- [129] Cap Prépa d'une filière de spé quelconque, V. Renvoizé
- [132] Dunod d'une filière de spé quelconque, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Électromagnétisme dans l'ARQS

♣ Idées à faire passer

Loi de Lenz
Vaste domaine d'application

♣ Plan

Introduction

Historique [132]

1. Phénomène d'induction

1.1. Mise en évidence expérimentale

♣ **Manip** : faire rentrer un aimant dans une bobine. Exploiter très soigneusement et jusqu'au bout. Conclusions : apparition d'un courant induit dépendant du sens de variation de \vec{B} , loi de Lenz, couplage électro-mécanique. Cas de Neumann et Lorentz.

1.2. Cas de Neumann

[129] Champ électromoteur. Loi de Faraday. Commenter la loi de Lenz.

1.3. Cas de Lorentz

[129] Changement de référentiel pour les champs. Champ électromoteur. Loi de Faraday, qu'on admettra sans démonstration.

1.4. Cas général

[75] Somme d'un terme de Neumann et d'un terme de Lorentz. Insister sur le fait que les différents cas représentent le même phénomène d'induction.

2. Production de courants induits

2.1. Le transformateur

[26, 75] Poser les équations. Rapport de transformation pour les courants et les tensions. On peut amplifier un courant ou une tension, mais pas les deux à la fois.

2.2. Freinage par courants de Foucault

[71] ♣ **Manip** : chute d'un aimant dans un tube conducteur. Parler des camions.

2.3. Chauffage par induction

[72], question 50. Explication qualitative.

3. Conversion électro-mécanique : exemple des rails de Laplace [132]

3.1. Étude expérimentale

Faire constater les deux cas : mise en mouvement lorsqu'on fait passer un courant, apparition d'un courant lorsqu'on force un mouvement.

3.2. Mise en équation

Se focaliser sur un des deux cas. Bien expliciter la force de Laplace. Bien insister sur les endroits où les phénomènes d'induction apparaissent.

Conclusion

Principe des générateurs : MCC, MAS

♣ Remarques

- ▷ Attention : les conventions de signe et d'orientation des circuits doivent être très claires tout le temps.
- ▷ Cette leçon me semble très longue, et pas très satisfaisante. Elle mériterait d'être pas mal retravaillée.
- ▷ J'ai fait le choix de ne pas du tout présenter les notions d'inductance propre et d'inductance mutuelle, puisque elles ne sont pas nécessaires pour les applications que j'ai choisi de traiter. C'est très discutable, et je ne sais pas si ce choix serait apprécié du jury (dont les rapports précisent quand même que « des choix sont à faire »).

LP23 : Résonance magnétique. Exemples et applications.

♣ Bibliographie

- [4] *Chimie physique*, P. Atkins : beaucoup de choses, mais fait à la façon des chimistes. Il faut l'avoir sérieusement lu et travaillé avant d'espérer s'en servir en leçon, mais il est très intéressant.
- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant : pour des ODG et un historique, donc pas très utile
- [29] *Physique atomique*, B. Cagnac
- [33] *Mécanique quantique I*, C. Cohen-Tannoudji : la RMN est très clairement traitée dans un complément
- [52] H-Prépa *Chimie PC-PC**, A. Durupthy : pour la RMN appliquée à la chimie

♣ Pré-requis

Mécanique quantique : système à 2 niveaux, théorème d'Ehrenfest
Mouvement de précession en mécanique classique
Notions de base sur la T.F.

♣ Idées à faire passer

On peut relier les approches classique et quantique
Intérêt de la réponse impulsionnelle

♣ Plan

Introduction

Applications IRM/RMN.

1. Interaction entre un moment magnétique et un champ [33]

1.1. Moments cinétique et magnétique

À traiter rapidement. Modèle de Bohr : rapport gyromagnétique. Généraliser au cas quantique (existence d'un moment cinétique de spin).

1.2. Approche classique

Reconnaître l'équation de précession, ne pas faire la résolution complète.

1.3. Approche quantique

Arriver aux oscillations de Rabi en utilisant les transparents, ou en sautant des étapes.

1.4. Équivalence des deux approches

Application du théorème d'Ehrenfest.

2. Spectroscopie RMN

2.1. D'un moment magnétique à l'aimantation

Impossibilité de suivre un moment magnétique seul. Définir l'aimantation. Processus de moyennage.

2.2. Principe : RMN continue

[29, 52] Principe de l'appareillage. ODG et production des champs magnétiques. Application à la détermination de la structure des molécules (déblindage etc.).

2.3. RMN impulsionnelle

[4] Principe : faire tourner l'aimantation moyenne, on regarde avec la bobine la relaxation vers l'équilibre. La TF donne directement le spectre complet.

2.4. Relaxation

[29] Constaté sur un spectre, donner l'origine physique. Modification des équations du mouvement.

3. Imagerie par Résonance Magnétique [4]

3.1. Écho de spin

Principe de la mesure du temps de relaxation.

3.2. Sélection de zones

Principe : gradient de champ.

3.3. Application à l'imagerie médicale

Principe, de toutes façons on n'aura probablement pas le temps de développer.

Conclusion

Insister sur les applications

LP24 : Systèmes bouclés et applications.

♣ Bibliographie

- [25] Précis Bréal *Électronique PSI*, P. Brenders
- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
- [77] *Automatique*, Y. Granjon : très bien pour la théorie générale
- [133] Dunod PSI-PSI*, M.N. Sanz
- [146] *Systèmes asservis linéaires*, M. Villain

♣ Pré-requis

Transformée de Laplace
Amplificateur opérationnel

♣ Idées à faire passer

Objectif du bouclage : contrôle du point de fonctionnement
Existence de deux classes de systèmes bouclés
Modélisation basée sur la linéarité
Nécessité des compromis précision vs. rapidité

♣ Plan

Introduction

Exemples de systèmes bouclés.

1. Modélisation d'un système bouclé

1.1. Objectif du bouclage

[77] Insuffisance de la boucle ouverte, objectif du bouclage : ctrl du point de fonctionnement.
Exemple : ballon d'eau chaude. Introduire le schéma bloc. Mentionner les oscillateurs auto-entretenus.

1.2. Outils de modélisation

[77, 25] Rappeler la définition d'une transformée de Laplace. Insister sur la linéarité. Fct de transfert. Diagrammes de Bode et de Nyquist.
[25] Définir boucle ouverte, boucle fermée sur l'exemple du non-inverseur à AO, établir $H = A/(1 + AB)$ sur l'exemple du non inverseur.

1.3. Stabilité d'un système bouclé

[133] Exemple du NI à AO. Revenir à l'équa diff à partir de la fct de transfert, stabilité sur l'équa diff.
[77, 146] Généraliser aux pôles de H à partie réelle positive. Critère du revers pour la stabilité. Mise en évidence des comportements systèmes asservis, oscillateurs, instables.

2. Systèmes asservis

Étude basée sur l'exemple de l'asservissement de position d'une MCC, avec réalisation expérimentale.

2.1. Modélisation

[47] Schéma bloc, fct de transfert, lieu de Nyquist et montrer que c'est stable.

2.2. Caractéristiques

[77] Donner les définitions : erreur statique, dépassement, temps de montée, temps de réponse, montrer expérimentalement.

Influence du gain, nécessité de compromis.

2.3. Conséquences du bouclage

[25] Sensibilité aux variations : très peu sensible à la chaîne directe, très sensible à la chaîne de retour + ODG.
[133] Reprendre les résultats pour le passe-bas, conclure gain \times bande passante = cste

3. Oscillateurs

3.1. Condition d'oscillation

[25] Définir un oscillateur et arriver à la condition de Barkhausen.

3.2. Exemple : l'oscillateur à pont de Wien

[133, 25] Présentation, arriver à la condition d'oscillation

3.3. Exemple : le laser

[à savoir] Présentation façon systèmes bouclés : ampli par le milieu amplificateur, filtrage par la cavité Fabry-Pérot, condition gain = pertes. Arriver aux non-linéarités : le gain dépend de l'intensité.

Conclusion

Ouvrir sur les oscillateurs à relaxation où une étude linéaire n'est plus possible.

♣ Attention !

Les conventions de signe sur la fonction de transfert de la chaîne de retour B changent selon les livres, et selon qu'on considère un asservissement ou un oscillateur.

LP25 : Traitement analogique d'un signal électrique. Etude spectrale. Exemples et applications.

♣ Bibliographie

[25] Précis Bréal, *Électronique PSI*, P. Brenders

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait : qu'on utilise pour une fois pour de la théorie sur la modulation

[130] Cap Prépa PSI-PSI*, V. Renvoizé : très bon sur ce sujet

♣ Pré-requis

Électrocinétique

Écriture complexe des signaux périodiques

♣ Idées à faire passer

Équivalence des représentations temps-fréquence

Possibilité de modifier de façon simple le contenu fréquentiel d'un signal

♣ Plan

Introduction

Intérêt du traitement de signaux physiques

1. Analyse fréquentielle d'un signal électrique

1.1. Signal périodique

[à savoir] cf. bonus. Montrer à partir de Matlab ou Maple qu'en sommant des sinusoides on obtient des signaux périodiques un peu comme on veut : triangle, créneau ...

[130] Généralisation : développement en série de Fourier, d'abord sin et cos, puis $\exp(i\omega t)$. Insister sur l'équivalence entre représentation de Fourier et représentation temporelle. Propriété vis-à-vis de la dérivation.

[25] Exemple : décomposition du signal créneau. Visualisation du spectre à l'oscillo.

1.2. Généralisation à un signal quelconque

[130] Définition de la transformée de Fourier.

2. Filtrage linéaire

2.1. Système linéaire invariant par translation temporelle

[130] Définition.

2.2. Représentation temporelle et spectrale

[130] S'appuyer sur l'exemple du filtre RC. Equation différentielle. Introduction de la fonction de transfert. Equivalence des deux approches.

2.3. Diagramme de Bode

Définir le diagramme de Bode. Montrer sa lecture : on superpose au diagramme de Bode le spectre du signal d'entrée, ce qui donne le spectre du signal de sortie.

Illustration expérimentale avec le filtre RC. Mentionner la pseudo-intégration.

2.4. Différents types de filtres

[130] Définir passe-bas, passe-haut, passe-bande et montrer les diagramme de Bode sur transparent. Parler de l'ordre du filtre.

Etude d'un deuxième exemple : passe-bande d'ordre 2

3. Opération non linéaire : exemple de la modulation d'amplitude [25, 47]

3.1. Principe et intérêt

Définir signal modulant, porteuse, modulé. Intérêt au transport d'information.

3.2. Spectre du signal modulé

Faire le calcul. Commenter l'enrichissement spectral.

3.3. Démodulation par détection synchrone

Expliquer le principe : qui est connu, qui est intéressant. Justifier à chaque fois à partir des spectres.

Conclusion

Intérêt pratique. Généralité du phénomène de filtrage.

♣ Attention !

Le danger de cette leçon est de se perdre dans des considérations trop formelles.

♣ Bonus : Code Matlab

Le code est très pédestre, mais devrait aussi être très simple à refaire dans des conditions d'oral!

```
close all  
clear all
```

```
t = [0:0.01:5];  
x = zeros(length(t));
```

```
f = 1;  
w = 2*pi*f
```

```
A1 = 1;  
A2 = 0;  
A3 = -1/9;  
A4 = 0;  
A5 = 1/25;  
A6 = 0;  
A7 = -1/49;  
A8 = 0;
```

```
x = A1*sin(w*t) + A2*sin(2*w*t) + A3*sin(3*w*t) + A4*sin(4*w*t) + A5*sin(5*w*t) +  
A6*sin(6*w*t) + A7*sin(7*w*t) + A8*sin(8*w*t);
```

```
plot(t,x)
```

LP26 : Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.

♣ Bibliographie

- [23] H-Prépa *Ondes*, J.M. Brébec
 [70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing
 [132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Électrocinétique
 Mécanique

♣ Idées à faire passer

Généralité du phénomène
 Liberté de la base de décomposition
 Rôle des conditions aux limites

♣ Plan

Introduction

🔗 **Manip** : intuitiver la notion d'onde à partir de la corde d'escalade

1. Exemples de phénomènes de propagation

1.1. Ondes dans un câble coaxial

[132] Modèle électrocinétique. Etablir l'équation d'onde.

1.2. Ondes sur une corde vibrante

[70, 132] Bien poser le modèle et les hypothèses. Établir l'équation d'onde.

1.3. D'autres exemples : analogies

[132] Transparent. Ondes acoustiques dans les solides, dans les fluides. Insister sur les analogies, les équations couplées et les grandeurs couplées.
 Définition d'une onde, à donner sans faire d'erreur !

2. Ondes progressives

2.1. Solution générale de l'équation de d'Alembert

[70] Démonstration.

2.2. Ondes planes progressives

[132] Interpréter la forme de la solution. Définir la notion d'impédance.
 Introduire les OPPS avec la linéarité. Base des solutions. Double périodicité et relation de dispersion.

2.3. Transport d'énergie par une onde plane progressive

[23] Étude énergétique du câble coaxial. Montrer qu'une onde plane progressive transporte de l'énergie. Généraliser à la corde.

3. Ondes stationnaires

3.1. Corde de Melde

[132] 🔗 **Manip** : oscillations forcées sur la corde de Melde. Constater expérimentalement le découplage entre espace et temps. Poser l'onde stationnaire. Montrer qu'une onde stationnaire est la somme de deux OPPS (trigo du cosinus).

3.2. Modes énergétiques

[70] Calculer l'énergie des modes. Montrer que l'énergie totale se répartit entre les modes.

3.3. Oscillations forcées et résonance

[132] Il existe une résonance aux fréquences propres

Conclusion

Ouvrir sur la dispersion

LP27 : Ondes acoustiques dans les fluides.

♣ Bibliographie

[70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing

[110] Tec&Doc PC-PC*, S. Olivier : seul livre où le bilan énergétique est traité

[129] Cap Prépa PC-PC* ou PSI-PSI*, V. Renvoizé : il ne sert que pour un ordre de grandeur, mais il faut s'en méfier car il y a des erreurs dans le cours. En particulier la définition d'une onde acoustique est fause ...

[132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz : le cours est vraiment bien fait

♣ Pré-requis

Mécanique des fluides

Thermodynamique

Physique des ondes

♣ Idées à faire passer

Les ondes acoustiques sont des ondes !

Ordres de grandeur associés

♣ Plan

Introduction

🌀 **Manip** : clap dans les mains, mise en évidence d'un phénomène de propagation. Insister sur la nécessité d'un milieu matériel.

1. Modélisation et mise en équation [132]

1.1. Approximation acoustique

Définir proprement l'approximation acoustique

1.2. Équation de propagation

Linéarisation des équations à 3d, éq de d'Alembert.

1.3. Vitesse de propagation

Discuter l'hypothèse adiabatique vs. isotherme. Revenir à un ODG de c à partir de la manip d'intro, et éliminer l'hypothèse isotherme expérimentalement. Parler du cas des liquides et des solides.

2. Ondes acoustiques planes progressives

2.1. Impédance acoustique

[132] Solution générale de l'éq de d'Alembert. Impédance : définition.

2.2. Aspects énergétiques

[110] Bilan énergétique, vecteur de Poynting et e . Écriture intégrale éventuellement. Intensité sonore.

2.3. Ordres de grandeur

Diagramme de Weber (seuils d'audibilité et de douleur en fct de la fréquence). Montrer l'image du CD.

Donner plein d'ODG sur intensité sonore, faire une mesure au sonomètre.

Validité de l'approximation acoustique

3. Réflexion et transmission

3.1. Réflexion et transmission sur un dioptre

[132] Calcul des coefficients en amplitude et en énergie. Discussion des cas limites.

3.2. Réflexions multiples

[70] Effet Fabry-Pérot, commenter la généralité à tous les phénomènes ondulatoires. Application à l'adaptation d'impédance. On peut aussi remonter à l'impédance acoustique du verre par la même manip qu'en montage, qu'on comparera à l'ordre de grandeur donné dans le Cap Prépa.

Conclusion

Applications à la télémétrie et à l'échographie

LP28 : Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.

♣ Bibliographie

- [68] *Ondes électromagnétiques dans le vide et les conducteurs*, C. Garing
 [84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : *a priori* l'ancienne édition ne contient pas tout.
 [91] BUP 649, *Propagation des ondes : vitesse de phase, vitesse de groupe*, B. Lahaye, 1982 : très belle discussion sur les ondes de surface
 [132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Équation de d'Alembert
 Électromagnétisme
 Tension de surface

♣ Idées à faire passer

Notion de paquet d'onde comme réponse au caractère non physique de l'onde plane
 Conséquences de la dispersion

♣ Plan

Introduction

L'équation de d'Alembert n'explique pas la déformation des signaux, qu'on rencontre pourtant fréquemment en télécommunications.

1. Ondes planes dans un plasma

1.1. Modélisation

[132] Présenter physiquement. Ecrire en notation réelle $\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{ne^2}{m}\vec{E}$ et définir ω_p

1.2. Équation de propagation

[à savoir] À établir en grandeurs réelles à partir des équations de Maxwell. Commenter la différence par rapport à l'équation de d'Alembert : le second membre est non nul.

1.3. Relation de dispersion

[à savoir] pour la démarche, [132] pour calcul. On justifie par linéarité la recherche de solution en ondes planes. Aboutir à la relation de dispersion. Définir la vitesse de phase avec les points de phase stationnaire.

2. Propagation d'un paquet d'ondes

2.1. Notion de paquet d'onde

[132] Caractère non physique de l'onde plane. Construction à partir d'un battement à deux ondes sans trop détailler. Définir ensuite un paquet d'onde.

2.2. Vitesse de groupe

[132] Faire le DL pour amener la vitesse de groupe. Montrer que dans le cas du plasma vitesse de groupe = vitesse de l'énergie.

2.3. Étalement du paquet d'ondes

[68] Continuer le DL à l'ordre suivant en admettant le résultat. Commenter la déformation du paquet d'onde.

3. Conséquences de la dispersion

3.1. Câble coaxial avec pertes

[132] et [68] pour ODG. Donner le modèle, l'équation de propagation, la relation de dispersion. Commenter le caractère complexe de \vec{k} . Montrer expérimentalement la déformation des pulses. ODG du débit d'information.

3.2. Ondes gravito-capillaires à la surface d'un liquide

[84, 91] Donner la relation de dispersion. Discuter comme dans le BUP.

Conclusion

Ouvrir vers la propagation guidée, où on a également de la dispersion

♣ Remarques

- ▷ La modélisation du plasma doit être très bien discutée et justifiée, avec force ordres de grandeurs. Il peut être intéressant de lire à ce sujet le premier chapitre du livre de *Physique des plasmas* de J.L. Delcroix [39].
- ▷ Un plan avec lequel j'ai pas mal hésité est de présenter le câble coaxial avec pertes en 1, et le plasma en 3. J'ai fait mon choix compte tenu du fait que la modélisation du plasma est plus intéressante à discuter que celle du câble, donc je lui réserve plus de temps, et que je préfère éviter toutes les questions sur la propagation guidée liées au câble coaxial.

LP29 : Propagation guidée. Exemples et applications.

♣ Bibliographie

- [68] *Ondes électromagnétiques dans le vide et les conducteurs*, C. Garing : deux exercices sur le câble coaxial
 [69] *Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques*, C. Garing
 [128] Cap Prépa MP-MP*, V. Renvoizé
 [132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz
 [138] *Optique physique*, R. Taillet : la démarche me plaît beaucoup, mais il y a plein d'erreurs dans les calculs de ce chapitre.

♣ Pré-requis

Optique
 Électromagnétisme
 Physique des ondes

♣ Idées à faire passer

Les caractéristiques de la propagation guidée : confinement, modes, dispersion

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : tube en plexi coudé (idem principe de Fermat)

1. Fibre optique à saut d'indice

Objectif : mettre en évidence les principales caractéristiques de la propagation guidée sur un modèle simple ne nécessitant pas trop de calculs.

1.1. Approche géométrique : confinement

[138] Présenter le système, condition de guidage : confinement

1.2. Approche ondulatoire : modes

[138] Condition d'interférences constructives. Définition d'un mode.

1.3. Conséquences : dispersion et bande passante

[138, 69] Dispersion intermodale, à bien opposer à la dispersion intramodale (pas prise en compte ici). Intérêt de la fibre à gradient d'indice : limite la dispersion intermodale. ⚠ **Attention** : il y a des erreurs de calcul dans le Taillet, à corriger avec le Garing. Notion de bande passante.

2. Guide d'ondes métallique [132]

Objectif : faire une approche électromagnétique dans une géométrie sympa pour limiter les calculs.

2.1. Position du problème

Guidage entre deux plans conducteurs parfaits. Recherche d'une onde TE.

2.2. Calcul des champs

Calculer complètement les champs \vec{E} et \vec{B} . Conclure que l'onde n'est que TE, et pas TEM. Bien opposer à la propagation libre. Aspect énergétique à faire sur transparent.

2.3. Relation de dispersion

À très bien discuter. Pulsation de coupure. Modes. Vitesse de phase, vitesse de groupe.

[128] Généraliser au cas d'un guide rectangulaire.

2.4. Interprétation en termes de superposition d'ondes planes

Lien avec l'approche géométrique

3. Le câble coaxial

Objectif : s'intéresser à un guide d'ondes réel, et justifier sa modélisation « classique » où on ne tient pas compte du guidage.

3.1. Modes d'un câble coaxial

[68] Donner la relation de dispersion. Dire à quelle condition on n'excite que le TEM₀₀

3.2. Modèle à constantes réparties

[68] Donner le résultat sur transparent. Justifier l'existence des constantes réparties. Donner des ODG, à piocher dans le Garing.

LP30 : Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modèle microscopique.

♣ Bibliographie

[21] ou [23] H-Prépa *Ondes* ou *Électromagnétisme 2ème année*, J.M. Brébec : mes notes ne précisent pas lequel des deux prendre et je ne m'en souviens plus, désolé!

[64] *Électromagnétisme I*, R. Feynman

[129] Cap Prépa PC-PC*, V. Renvoizé

[132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Équations de Maxwell

Physique des ondes

♣ Idées à faire passer

Réponse linéaire et modèle microscopique

Nécessité de relations constitutives.

♣ Plan

Introduction

Lien avec l'optique sur les propriétés du verre.

1. Propriétés des diélectriques [129]

1.1. Première approche

[64] ☞ **Manip** : plaque de plexiglas dans le condensateur d'Aepinus. Polarisation du diélectrique.

1.2. Densité dipolaire volumique

Vecteur polarisation, densité de courant, densité de charges.

1.3. Équations de Maxwell dans un diélectrique

Décompte des équations et des inconnues. Compter deux équations pour un rotationnel. Nécessité d'une relation constitutive.

2. Modèles microscopiques

2.1. Différents types de polarisation

[129] Électronique, orientation, ionique.

2.2. Modèle de l'électron élastiquement lié

[132] ch. OEM dans le vide. Poser le modèle, justifier tous les termes

2.3. Généralisation : diélectrique L.H.I.

[132] Prise en compte des autres types de polarisation. Commentaire sur les hypothèses L, H et I et ce qu'elles impliquent dans l'écriture de la relation constitutive.

3. Ondes dans un diélectrique L.H.I. [23, 132, 129]

3.1. Structure de l'onde et relation de dispersion

Structure de l'onde, relation de dispersion, solution (onde amortie si k'' non nul). La dispersion est reliée à k' (vitesse de phase/vitesse de groupe).

3.2. Absorption

L'absorption est reliée à k'' . Calcul de puissance et de vecteur de Poynting. On retrouve Beer-Lambert si k'' est proportionnel à la concentration, donc milieux dilués.

3.3. Dispersion et loi de Cauchy

Démontrer la loi de Cauchy dans le régime où il y a peu d'absorption. Rappeler la courbe de la susceptibilité et identifier les zones concernées. Commentaire essentiel : dispersion et absorption vont de paire.

Conclusion

Optique non linéaire.

♣ Attention !

Les conventions de signe sur k' et k'' varient selon les livres, et le jury dit explicitement qu'il faut y faire très attention et les préciser.

LP31 : Effet de peau. Comportement d'une onde électromagnétique à la surface d'un conducteur.

♣ Bibliographie

- [68] *Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs*, C. Garing
 [110] Tec&Doc PC-PC*, S. Olivier
 [121] *Électromagnétisme*, J.P. Pérez
 [129] Cap Prépa PC-PC* ou MP-MP*, V. Renvoizé
 [132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Équations de Maxwell
 Ondes électromagnétiques
 Relations de passage

♣ Idées à faire passer

Un conducteur n'aime pas les champs
 L'effet de peau est propre aux conducteurs, pas aux ondes
 Intérêt et validité du modèle du conducteur parfait

♣ Plan

Introduction

Pourquoi utiliser des câbles coaxiaux plutôt que des fils de cuivre standards quand on travaille à hautes fréquences ?

1. Modélisation d'un conducteur

1.1. Modèle de Drüde

[129] Hypothèses, modélisation des interactions.

1.2. Loi d'Ohm en régime sinusoïdal

[129, 132] Appliquer l'équation de la dynamique, en déduire la conductivité complexe. ODG. Justifier que l'on peut bien négliger la force magnétique en estimant la vitesse moyenne des électrons.

1.3. Puissance transmise au conducteur

[129] Distinguer les régimes dissipatif et non-dissipatif

1.4. Électroneutralité

[129] Conclusion : on se place à $\omega \ll 1/\tau$, donc la densité de charge est nulle.

2. Onde électromagnétique à la surface d'un conducteur

2.1. Formule de Fresnel

[121, 68] Écrire les relations de passage, puis les formules (avec k complexe et non l'indice) sans démonstration qui prendrait trop de temps. ODG.

2.2. Équation de propagation dans le conducteur

[129] Écrire l'équation de Maxwell-Ampère, justifier l'A.R.Q.S., établir l'équation de diffusion.

2.3. Ondes atténuées dans le conducteur

[129] Obtenir l'onde amortie. Interpréter : courants induits, dissipation. ODG de la longueur de peau. Discuter ses dépendances et la limite où elle tend vers 0 (conducteur parfait).

3. Effet de peau

3.1. Distribution de courant dans un fil

[68] Donner la formule, ODG. Insister sur le fait qu'on a le même effet de répulsion du champ sur les bords du conducteur, et que c'est la même longueur caractéristique qui intervient.

3.2. Origine inductive de l'effet de peau

[110] Suivre simplement la discussion.

3.3. Limite du conducteur parfait

[121, 129] Formules de Fresnel dans la limite du conducteur parfait. Charges et courants surfaciques. Structure de l'onde au voisinage de la surface : onde stationnaire, car on a une condition aux limites strictes.

3.4. Métal à haute fréquence

[68] À faire si le temps. Régime haute fréquence : onde évanescente (onde lumineuse sur un conducteur), métal transparent.

Conclusion

Autres effets de peau : thermique, visqueux.

♣ Remarques

- ▷ Il y a des erreurs dans le Cap Prépa : racines manquantes, signes oubliés . . .
- ▷ Cette leçon a été testée, et raccourcie en conséquence. Ceci dit je pense qu'elle est encore assez longue.

LP32 : Propriétés et applications du rayonnement dipolaire électrique.

♣ Bibliographie

[129] Cap Prépa PC-PC* ou MP-MP*, V. Rivoizé

[132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Équations de Maxwell

Ondes électromagnétiques dans le vide

Modèle de l'électron élastiquement lié.

♣ Idées à faire passer

Hypothèses du modèle de rayonnement dipolaire

Une charge doit être accélérée pour rayonner

Structure des champs rayonnés

♣ Plan

Introduction

Neutralité globale de la matière, qui joue sur le rayonnement.

1. Position du problème et approximations

[129, 132] Distribution de charges (discrète), on cherche les champs rayonnés.

Approximation dipolaire électrique $r \gg a$, et hypothèse $a \ll \lambda$.

2. Champs rayonnés [129]

2.1. Calcul des champs

Calcul du potentiel vecteur. Calculer \vec{B} complètement. Donner la formule de \vec{E} .

2.2. Zone de rayonnement

Simplifier les termes dans la zone de rayonnement.

2.3. Structure des champs

Structure d'onde localement plane.

2.4. Aspects énergétiques

Calcul du vecteur de Poynting et de la puissance rayonnée. Diagramme de rayonnement. Cas de la charge accélérée.

3. Diffusion par des dipôles élémentaires [132]

☞ **Manip** : diffusion par du lait entier

3.1. Modélisation

Expliquer que la matière est composée de dipôles qui vont rayonner (modèle électron élastiquement lié).

3.2. Puissance rayonnée

Effets de couleur

3.3. Polarisation par diffusion

Illustration expérimentale et justification qualitative.

4. Rayonnement d'antennes [129]

4.1. Champs rayonnés par une antenne de petite taille

Exploiter le 2.

4.2. Rayonnement à grande distance d'une antenne réelle

Il faut sommer sur des antennes élémentaires (pour lesquelles l'ARQS des sources reste bien vérifiée), et montrer les diagrammes de rayonnement.

Conclusion

Production de rayons X (cyclotron ...). Invalidité du modèle classique de l'atome.

LP33 : Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat. Exemples.

♣ Bibliographie

- [9] *Optique géométrique*, T. Bécherrawy
 [12] *Optique géométrique*, BFR
 [86] *Optique*, S. Houard
 [119] *Optique*, J.P. Pérez

♣ Pré-requis

Optique géométrique de lycée

♣ Idées à faire passer

Le principe de Fermat est un principe variationnel
 Il contient toute l'optique géométrique

♣ Plan

Introduction

Historique.

1. Cadre de l'optique géométrique

1.1. Rayon lumineux

[12] Introduire la notion de rayon lumineux.

1.2. Chemin optique

[9] Définition du chemin optique avec le temps de vol.

1.3. Principe de Fermat

[12] Stationnarité par rapport à des chemins fictifs voisins.

2. Lois de l'optique géométrique

2.1. Propagation rectiligne et retour inverse

[119] Milieu homogène : propagation rectiligne. Cas général : $(AB) = (BA)$. 🚫 **Attention** : il y a une erreur dans la démonstration du BFR.

2.2. Lois de Snell-Descartes

[119, 12] Démonstration vectorielle.

2.3. Équation des rayons lumineux

[119, 9] Équation des rayons lumineux sans démonstration.

3. Applications

3.1. Mirages

[86, 9] Manip : cuve avec eau + surce. Montrer des photos. Loi de Gladstone. Mirage supérieur et inférieur.

3.2. Fibres optiques

[86] M🔗 Manip : tube en plexiglas coudé. Fibre à saut d'indice : ODG, problème de la dispersion. Fibre à gradient d'indice.

3.3. Stigmatisme des systèmes optiques

[12, 9] Traiter quelques exemples de stigmatisme rigoureux et le cas du dioptré plan (stigmatisme approché).

4. Lien avec l'optique ondulatoire

4.1. Surface d'onde

[12] cours + appendice « les ondes et l'optique géométrique ». Définir une surface d'onde.

4.2. Théorème de Malus

[119] Démonstration.

Conclusion

Parler du lien avec l'électromagnétisme.

LP34 : Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix.

♣ Bibliographie

- [41] *Les instruments d'optique*, L. Dettwiller : donne quelques ordres de grandeur
- [46] *Expériences d'optique*, R. Duffait : pour la partie expérimentale
- [86] *Optique*, S. Houard : le livre est vraiment excellent, et fait la leçon à lui tout seul

♣ Pré-requis

Rayons lumineux
Lentilles
Diffraction

♣ Idées à faire passer

Qualités attendues d'un instrument d'optique
Il faut adapter l'instrument à l'œil

♣ Plan

[46] 🧑 **Manip** : construction sur banc d'optique et étude expérimentale d'une lunette astronomique au fur et à mesure de la leçon.

Introduction

Limitation de l'œil pour observer des étoiles, bref historique de la lunette.

1. Structure d'une lunette astronomique

1.1. Marche des rayons

Modélisation en objectif et oculaire, schéma au tableau et construction sur banc d'optique.

1.2. Grossissement

Définition, calcul. Mesure expérimentale rapide. ODG.

2. Un collecteur de lumière

2.1. Cercle oculaire

Diaphragme d'ouverture : définition, illustration expérimentale. Pupille d'entrée, de sortie, cercle oculaire.

2.2. Grossissement équipupillaire

Intérêt et définition. ODG.

2.3. Clarté

Définition et calcul dans le cas d'un objet non résolu. On admet le résultat dans le cas d'un objet résolu.

3. Champ

3.1. Diaphragme de champ et vignettage

Explication qualitative sur un schéma. Vignettage, champ de contour, champ de pleine lumière, à illustrer sur la manip à l'aide d'une grille. Diaphragme de champ et verre de champ.

3.2. Champ image et champ objet

Définition du champ de vision. ODG.

4. Résolution

4.1. Diffraction

Critère de Rayleigh, et intérêt d'un objectif de grand diamètre. Illustration expérimentale avec Caliens.

4.2. Limitations dues à l'œil

Résolution de l'œil. Grossissement résolvant et optimal.

4.3. Autres limitations

Aberrations chromatiques, géométriques. Turbulence atmosphérique.

Conclusion

C'est un instrument historique, mais plus actuel, où on utilise plutôt des télescopes.

♣ Remarque

Nous avons préparé et présenté cette leçon à la classe pendant l'année. Elle est d'une bonne longueur, et avait reçu des commentaires très positifs des correcteurs.

LP35 : Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.

♣ Bibliographie

[24] H-Prépa *Optique ondulatoire*, J.M. Brébec

[46] *Expériences d'optique*, R. Duffait : pour la partie expérimentale

[129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé : c'est le livre essentiel pour cette leçon

[132] Dunod d'une filière de spé, M.N. Sanz : complète certains points ou certains calculs

♣ Pré-requis

Optique géométrique

Électromagnétisme

Détecteurs optiques

Physique des ondes

♣ Idées à faire passer

Moyennage réalisé par un détecteur optique

Phénomène d'interférence, de nature ondulatoire, sous condition de cohérence

A priori on superpose les champs, mais si ondes non cohérentes il suffit de superposer des amplitudes.

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : une fente simple et deux fentes d'Young → ce qu'on observe est pour le moins contre-intuitif!

1. Interférences à deux ondes

1.1. Description ondulatoire de la lumière et détecteurs

Modèle ondulatoire de la lumière : onde plane sinusoïdale avec phase. Écrire les champs.

Intensité lumineuse, chemin optique.

1.2. Superposition de deux ondes

Obtenir le terme d'interférences avec les champs. On n'a pas l'éclairement prévu intuitivement, définir les interférences. Interférences constructives/destructives.

1.3. Conditions d'obtention

Polarisations identiques, d'où on passe au modèle scalaire. Transformer le terme d'interférences pour faire sortir les conditions. Obtenir la formule des interférences à 2 ondes.

Bien faire ressortir la cohérence comme condition d'observation d'interférences. *A priori* on superpose les champs, mais si ondes non cohérentes il suffit de superposer des amplitudes. Interprétation avec les trains d'onde.

2. Figures d'interférences et dispositifs interférentiels

2.1. Figure d'interférences

Montrer les hyperboloïdes, commenter avec les symétries. Tout dépend du plan de l'écran par rapport aux sources. On va traiter le cas des fentes d'Young.

2.2. Un exemple : les fentes d'Young

Calcul de différence de marche, éclairement sur l'écran, interfrange etc. Définir le contraste.

2.3. Dispositifs interférentiels

[46] Présentation rapide sur transparent : miroirs de Fresnel, Michelson, anneaux de Newton. Division du front d'onde et d'amplitude.

3. Cohérence spatiale

3.1. Mise en évidence expérimentale

☞ **Manip** : élargir la fente source sur la manip des fentes d'Young

3.2. Contraste

Calcul de l'éclairement. Contraste local.

3.3. Longueur de cohérence

Définir. Insister qu'elle caractérise la façon dont l'interféromètre voit la source, et pas seulement la source.

4. Cohérence temporelle

4.1. Raie rectangulaire

Reconnaître le calcul du 3.2. Perte de cohérence, interprétation avec les trains d'onde.

☞ **Manip** : lampe à Na sur les anneaux de Newton.

4.2. Lumière blanche

[24] Comme une raie rectangulaire large. Spectre canelé.

☞ **Manip** : lampe QI sur les anneaux de Newton.

4.3. Spectroscopie

Faire remarquer que l'on obtient la TF de la distribution spectrale de la source.

Conclusion

Spectroscopie nécessite d'avoir beaucoup de lumière, donc une source large : problème avec la cohérence temporelle, vers la division d'amplitude.

♣ Remarque

Cette leçon est sûrement très très longue. Il faudrait enlever des choses, mais tout me semble important.

LP36 : Interféromètres à division d'amplitude. Applications.

♣ Bibliographie

- [24] H-Prépa *Optique ondulatoire*, J.M. Brébec
 [129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé
 [132] Dunod d'une filière de spé, M.N. Sanz
 [138] *Optique physique*, R. Taillet

♣ Pré-requis

Optique ondulatoire et interférences
 Notion de cohérence
 Division du front d'ondes

♣ Idées à faire passer

Intérêt de la division d'amplitude, avec en contrepartie la contrainte de localisation
 Technologie de l'interféromètre de Michelson

♣ Plan

Introduction

Limites de la division du front d'onde.

1. Théorème de localisation [24]

1.1. Extension de la source

Différence de différence de marche entre deux points de la source. 🚫 **Attention** : il y a une erreur de signe dans la démonstration du H-Prépa.

1.2. Condition de non brouillage et localisation

Dégager l'intérêt de la division d'amplitude : elle permet le non-brouillage. Énoncé du théorème de localisation.

2. Interféromètre de Michelson [129, 132]

2.1. Principe

Bref historique. Présenter l'interféromètre : schéma projeté + montrer sur le dispositif réel.

2.2. lame d'air

Schéma équivalent, calcul de différence de marche. Éclairage et lieu de localisation.

🔗 **Manip** : montrer les annulations de contraste du sodium. Application à la spectroscopie.

2.3. Coin d'air

Schéma équivalent, calcul de différence de marche. Éclairage et lieu de localisation.

🔗 **Manip** : passage en lumière blanche et visualisation des défauts de surface d'une lame.

3. Interféromètre de Fabry-Pérot

3.1. Description

[138] Présenter le dispositif sur un schéma. Éclairage et lieu de localisation.

3.2. Figure d'interférences

[138] Différence de marche par analogie avec le Michelson. Faire le calcul de l'intensité. Finesse. Meilleure résolution qu'avec un Michelson.

3.3. Application au filtre interférentiel

[129] Principe rapide et ODG. On peut mentionner aussi les lasers.

Conclusion

Applications : spectroscopie et mesure de défauts.

♣ Remarques

J'ai présenté cette leçon le jour de l'oral. J'ai manqué de temps, si bien que je n'ai pas présenté le paragraphe 3.2 et que j'ai été très rapide et purement qualitatif sur le 3.3. Les questions ont porté principalement sur les expériences que j'avais présentées, sur les rôles de la compensatrice dans le Michelson, et sur les ordres de grandeurs de longueurs et d'angles mesurables par interférométrie.

Lors de la discussion après la proclamation des résultats, le jury m'a confirmé que l'objectif de la leçon est de montrer en quoi la division d'amplitude résout le problème de la cohérence spatiale, plutôt que de présenter la technologie des interféromètres. Ainsi d'après le jury il est préférable de démontrer le théorème de localisation plutôt que d'explicitier le calcul d'intensité dans le Fabry-Pérot.

LP37 : Diffraction de Fraunhofer. Applications.

♣ Bibliographie

- [30] *Ondes lumineuses*, J.R. Champeau
- [129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé
- [132] Dunod d'une filière de spé, M.N. Sanz
- [138] *Optique physique*, R. Taillet

♣ Pré-requis

Modèle scalaire de la lumière
 Interférences
 Optique géométrique
 Notions sur la transformée de Fourier

♣ Idées à faire passer

La diffraction de Fraunhofer est celle qui a lieu au voisinage des images optiques
 Caractéristiques de la diffraction de Fraunhofer
 Aspect TF : toute l'info sur la pupille est contenue (différemment) dans la figure de diffraction

♣ Plan

Introduction

🔗 **Manip** : mise en défaut de l'optique géométrique quand on ferme une fente

1. Principe d'Huygens-Fresnel et diffraction de Fraunhofer

1.1. Principe d'Huygens-Fresnel

[129] Position du problème avec une pupille. Énoncé du principe. Mise en équation. Transparence de la pupille.

1.2. Diffraction de Fraunhofer

[138] Développement limité de l'exponentielle du principe de Huygens-Fresnel. Donner l'expression avec les angles. Justifier que si on ajoute une lentille on obtient le cas de Fraunhofer rigoureux.

[30] La diffraction de Fraunhofer est aussi celle qu'on obtient autour d'une image géométrique (sans démo).

2. Exemples de figures de diffraction [138]

2.1. Diffraction par une fente rectangulaire

Prendre une fente rectangulaire finie dans les deux directions. Commenter le cas de la fente fine.

2.2. Diffraction par un trou circulaire

Ne pas faire de calcul, aller droit au résultat.

Application : critère de Rayleigh pour la résolution d'un instrument d'optique

3. Propriétés des figures de diffraction [129]

3.1. Translation de la pupille

Démonstration. Commenter : on est à l'image géométrique de la source, qui ne bouge pas.

3.2. Dilatation

Commenter par rapport aux deux exemples précédents

3.3. Théorème de Babinet

On le démontrera si on a le temps.

4. Optique de Fourier [138, 30]

4.1. Diffraction de Fraunhofer et transformée de Fourier

Être pédagogue pour introduire la notion de fréquence spatiale. Partir de l'expression avec les angles, et raisonner par analogie avec l'électronique.

4.2. Application au filtrage

🔗 **Manip** : expérience d'Abbe. Application à la microscopie de contraste de phase, à la visualisation d'écoulement.

Conclusion

Ouverture sur les réseaux

♣ Remarque

La leçon a été testée. Elle n'est pas si longue que ça, mais il faut veiller à ne pas se noyer dans les calculs. On a très vite fait de vouloir en montrer trop, et de ne pas avoir le temps de terminer la leçon.

LP38 : Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique.

♣ Bibliographie

- [3] *Physique des solides*, N. Ashcroft
- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant : pour des ordres de grandeur
- [70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing
- [119] *Optique*, J.P. Pérez
- [127] *La physique par les objets quotidiens*, C. Ray
- [129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé

♣ Pré-requis

Diffraction de Fraunhofer
Acoustique
Cristallographie
Ondes de matière

♣ Idées à faire passer

Le phénomène est propre aux ondes en général, et pas à la nature de l'onde
Facteur de forme et de structure

♣ Plan

Introduction

On a vu la diffraction, on a vu les deux fentes d'Young, maintenant on va mettre N objets et décrire ce qui se passe.

1. Réseau plan en optique

☞ **Manip** : toute cette partie est à illustrer expérimentalement.

1.1. Position du problème

[129, 119] Définition d'un réseau. Eclairement parallèle. Rappel du principe de Huygens-Fresnel dans le cas de la diffraction de Fraunhofer.

Donner des ODG de pas des réseaux et de longueurs d'ondes. Nature des ondes considérées (électromagnétiques). Nature de la structure périodique (période $1d$)

1.2. Calcul de l'intensité diffractée

[119] pour la démarche, [129] pour le reste. Mener le calcul. Tracer la courbe et commenter. Identifier facteur de forme (lié à la forme d'un motif) et facteur de structure (lié à la répartition des motifs).

1.3. Utilisation d'un réseau en spectrométrie

[129] Formule des réseaux, ordres. Pouvoir de résolution. Discuter l'influence des différents paramètres. Tout montrer expérimentalement.

2. Échographie

2.1. Principe de l'échographie

[70, 127] Principe et utilisations de l'échographie.

Donner des ODG de distance et de longueurs d'ondes. Nature des ondes considérées (acoustique). Nature de la structure périodique.

☞ **Attention** : En échographie ce n'est pas de la diffraction au sens strict : les transducteurs sont les « sources secondaires » qui vibrent de façon cohérente.

2.2. Intérêt d'utiliser plusieurs transducteurs

[70] Un réseau de transducteurs permet d'augmenter considérablement la directivité.

2.3. Balayage par déphasage

[70] Un déphasage contrôlé entre les sources permet de choisir la position du maximum principal.

3. Étude de cristaux par diffraction [3]

3.1. Position du problème

Rappel rapide de cristallographie : définition des vecteurs du réseau.
Méthode d'étude : diffraction de rayons X. ODG.

3.2. Position des maximums de diffraction : approche de von Laue

Condition d'interférences constructives. Commentaire essentiel : on a une condition sur les trois composantes de \vec{k} , et plus seulement sur une seule. Observer des pics dans les cristaux est donc beaucoup plus dur.

Méthodes expérimentales : faisceau polychromatique, poudre, cristal tournant.

3.3. Facteur de forme et de structure

[à savoir] Réinvestir les définitions précédemment données

Conclusion

Réseau d'antennes, étude de structures amorphes : modification du facteur de structure

♣ Remarques

- ▷ Le Ashcroft n'est pas synthétique et pas toujours limpide. Il faut vraiment savoir où on va.
- ▷ Avoir à l'esprit qu'on ne fait ni plus ni moins que des TF, avec donc toutes les propriétés qui en découlent. Ceci étant, c'est sans doute un peu violent de faire la leçon directement en TF.

LP39 : Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications.

♣ Bibliographie

- [29] *Physique atomique*, B. Cagnac : fait les calculs du refroidissement si besoin, mais ce n'est pas indispensable
 [36] *Les lasers*, D. Dangoisse
 [138] *Optique physique*, R. Taillet : clair sur la physique, mais il y a des erreurs dans les calculs

♣ Pré-requis

Optique ondulatoire
 Notion de photon
 Distribution de Maxwell-Boltzmann
 Corps noir

♣ Idées à faire passer

Émission stimulée et son importance
 Fonctionnement du laser, et notamment l'importance de la cavité

♣ Plan

Introduction

Corps noir = équilibre entre le rayonnement et la matière. Par quels processus ?

1. Interaction matière-rayonnement [138]

1.1. Modélisation du milieu matériel

[36] Atomes à spectre discret. On considère deux niveaux.

1.2. Emission spontanée

☛ **Attention** : Écrire des probabilités de transition à un atome comme le fait Taillet est faux, car ça donne des lois de probabilité non normées.

1.3. Absorption

☛ **Manip** : résonance optique du sodium

1.4. Emission stimulée ou induite

1.5. Relation entre les coefficients d'Einstein

[36, 138] Cas d'une situation d'équilibre matière-rayonnement, mais relations générales. Calculer des ODG pour une lampe spectrale usuelle : émission stimulée négligeable.

2. Le laser

2.1. Principe

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

[36, 138] Expliquer le principe d'un laser, en dégageant le rôle de la cavité. Nécessité de l'inversion de population et du pompage.

2.2. Laser à trois niveaux

[36] Mener le calcul pour montrer la possibilité d'une inversion de population. Mentionner les cas deux niveaux et quatre niveaux.

2.3. Largeur spectrale

[138] La cavité Fabry-Pérot affine le spectre en sélectionnant seulement certaines fréquences.

☛ **Manip** : laser transparent, observation du spectre dans le faisceau et de côté avec SpidHR

3. Refroidissement d'atomes par laser

[36, 29] Expliquer le principe avec beaucoup d'ODG. Expliquer que cette méthode de refroidissement vient après l'utilisation de machines thermiques type frigo, puis de détente de gaz.

Conclusion

Applications des lasers

♣ Remarque

Nous avons préparé et présenté cette leçon à la classe pendant l'année. Elle est d'une bonne longueur, et avait reçu des commentaires très positifs des correcteurs.

LP40 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.

♣ Bibliographie

- [29] *Physique atomique*, B. Cagnac : prendre le tome 1, et surtout l'édition la plus récente
- [36] *Les lasers*, D. Dangoisse
- [132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz
- [138] *Optique physique*, R. Taillet

♣ Pré-requis

Optique
Électromagnétisme
Relativité restreinte

♣ Idées à faire passer

Quantification
Dualité onde-corpuscule

♣ Plan

Introduction

Démarche historique et corps noir.

1. Effet photoélectrique [29]

1.1. Faits expérimentaux

☞ **Manip** : électroscope. Observations plus générales.

1.2. Interprétation

Seuil. Insister sur la nécessité du photon pour interpréter. Contre-tension. Retour sur la manip.
Conclusion : existence du photon, $E = h\nu$

2. Caractéristiques du photon

On a postulé l'existence du photon. Il faut que ses propriétés soient compatibles avec ce que l'on sait des ondes électromagnétiques.

2.1. Quantité de mouvement

[132] exercice du chapitre ondes EM dans le vide. Résultat pour le photon.
[138] Application : pression de radiation.

2.2. Masse et vitesse

Signal lumineux = paquet de photons, se propage à c , donc il est logique de postuler que les photons aussi.
On injecte dans les relations de relativité : on trouve $m = 0$. Remarque sur la théorie quantique des champs.

2.3. Moment cinétique

[29] Postuler sans démonstration. En MQ, deux états de moment cinétique possibles.

3. Conséquences expérimentales

3.1. Effet Compton

[29] Mener le calcul relativiste. L'effet Compton ne s'interprète qu'avec la notion de photon.

3.2. Refroidissement laser

[36] Rester qualitatif sans faire de calcul (qui sont au besoin dans le Cagnac). Pour introduire le problème des ondes « plus résonante » ou « moins résonante », on utilise les spectres d'absorption des atomes (connus) plutôt que l'hypothèse d'un système à deux niveaux.

3.3. Expérience de Beth

[29] Présenter qualitativement l'expérience, qui montre le moment cinétique du photon.

Conclusion

Dualité onde/corpuscule et ouverture vers la fonction d'onde.

♣ Remarques

- ▷ Pour symboliser un photon sur un schéma, on note γ et pas $h\nu$
- ▷ La quantification de la matière n'est pas supposée connue
- ▷ On ne fait pas de démonstrations rigoureuses : au mieux, on montre que tout est cohérent
- ▷ **IMPORTANT** : il y a des erreurs scientifiques dans ce plan, que j'ignorais au moment de passer l'agreg. Ni l'effet photoélectrique, ni l'effet Compton ne sont des preuves de l'existence du photon. L'effet photoélectrique peut aussi s'interpréter avec un modèle de champ classique et de matière quantifiée. L'effet Compton ne fait intervenir qu'un bilan d'énergie et d'impulsion, qu'on peut aussi bien attacher au champ qu'au photon (c'est d'ailleurs la démarche de la partie 2). Se reporter à la correction sur ma page web pour plus de précision : en ayant beaucoup mieux compris ce qu'est un photon grâce à ma thèse, je ne ferais plus la leçon comme ça.

LP41 : Aspect ondulatoire de la matière. Notion de fonction d'onde.

♣ Bibliographie

- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant
 [33] *Mécanique quantique*, tome I, C. Cohen-Tannoudji

♣ Pré-requis

Optique
 Électromagnétisme
 Aspect corpusculaire du rayonnement
 Mécanique du point

♣ Idées à faire passer

Dualité onde corpuscule
 Approche probabiliste de la MQ
 On étend la mécanique classique mais on ne la remplace pas

♣ Plan

Introduction

Situation historique : rayonnement vs. méca, mais problème avec le corps noir → notion de photon. Ici on généralise la dualité onde-corpuscule.

1. Comportement ondulatoire de la matière

1.1. Rappel sur le comportement corpusculaire du rayonnement

Dualité onde corpuscule et relations d'Einstein. Être bref.

1.2. Mise en évidence expérimentale

☞ **Manip** : diffraction d'électrons. Dévier le faisceau avec un aimant.
 [8] Mentionner Davisson et Germer, et les manip de neutrons à l'ILL.

1.3. Relations de de Bröglie

[33] Énoncé et cohérence. Donner des ODG.

2. Description quantique de la matière

2.1. Fentes d'Young quantiques

[8] Montrer l'image du CD. Insister beaucoup sur l'aspect probabiliste, et la dualité onde corpuscule. Mentionner le problème de la mesure. Conclure par « il faut sommer des amplitudes de probabilité ».

2.2. Notion de fonction d'onde

[8] Postuler la fonction d'onde. Donner ses propriétés : normalisation, nombre complexe, interprétation probabiliste, on remplace deux vecteurs \vec{r} et \vec{p} par un champ scalaire $\psi(\vec{r})$.

3. Dynamique de la fonction d'onde

3.1. Équation de Schrödinger

[33] Énoncé comme un postulat (équation complète avec potentiel). Linéarité. Application à la particule libre pour interpréter l'énergie cinétique.

3.2. Paquet d'onde

[8] Problème de la non-normalisabilité de l'onde plane. Calcul de la vitesse de groupe, on retrouve le résultat classique, ouf!

3.3. Inégalités d'Heisenberg

[33] Les énoncer comme propriétés de la TF. Donner le sens physique et des ODG.

Conclusion

Rappeler que la MQ est pertinente à l'échelle micro, mais qu'à l'échelle macro la mécanique classique est toujours valable. Limitations de la fonction d'onde (spin, phys stat), nécessité d'un formalisme plus poussé (spineurs et matrices densités).

LP42 : Exemples de phénomènes quantiques.

♣ Bibliographie

- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant
 [29] *Physique atomique*, B. Cagnac : prendre le tome 1, et surtout l'édition la plus récente
 [33] *Mécanique quantique*, tome I, C. Cohen-Tannoudji

♣ Pré-requis

Dualité onde-corpuscule : photon et ondes de matière
 Formalisme de la mécanique quantique

♣ Idées à faire passer

Montrer la nécessité de la mécanique quantique pour interpréter des phénomènes que la physique classique ne peut expliquer

♣ Plan

Introduction

On a construit un formalisme, on va voir comment il permet d'expliquer des expériences.

1. Quantification des échanges d'énergie : effet photo-électrique [29]

1.1. Observations expérimentales

§ **Manip** : électroscope. Observations plus générales sur l'effet photoélectrique.

1.2. Insuffisance de la physique classique

Opposer classique et quantique : tension de seuil et instantanéité.

1.3. Interprétation quantique

Insister sur la nécessité du photon pour interpréter. Contre-tension.

2. Dualité onde-corpuscule : interférences atomiques [8]

2.1. Dispositif expérimental

Montrer l'image du CD.

2.2. Préviation classique

2.3. Résultats expérimentaux

Interférences et aspect probabiliste.

2.4. Interprétation quantique

Dualité onde-corpuscule. Signification physique de la fonction d'onde.

3. Notion de spin : expérience de Stern et Gerlach [8]

3.1. Dispositif expérimental

3.2. Préviation classique

3.3. Résultats expérimentaux

3.4. Interprétation quantique

Notion de spin, quantification selon l'axe (Oz).

4. La mesure en mécanique quantique [8, 33]

4.1. Dispositif expérimental

On met bout à bout trois appareils de Stern et Gerlach.

4.2. Préviation "classique"

On considère acquise la quantification selon (Oz), mais on fait comme si les observables commutaient.

4.3. Résultats expérimentaux

Si on remesure selon (Oz) pas de problème, par contre une mesure selon (Ox) détruit la mesure précédente.
 Conclusion : la mesure modifie l'état du système.

4.4. Interprétation quantique

L'état du système est décrit par un ket. L'application d'un Stern et Gerlach est elle décrite par application d'une matrice de Pauli à ce ket. Non commutativité des mesures se retrouve dans la non commutativité du produit matriciel.

Si on a le temps, on peut éventuellement parler de cryptographie quantique.

Conclusion

Les phénomènes quantiques diffèrent de la physique classique (youpi!).

♣ Remarques

- ▷ S'attacher à bien décrire les dispositifs expérimentaux, montrer des schémas soignés, et des vrais résultats de mesures
- ▷ Bien insister sur l'endroit où les phénomènes quantiques apparaissent : dualité onde-corpuscule, spin qui n'a pas d'équivalent classique

LP43 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples.

♣ Bibliographie

- [7] *Problèmes quantiques*, J.L. Basdevant
- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant
- [29] *Physique atomique*, B. Cagnac
- [33] *Mécanique quantique*, tome I, C. Cohen-Tannoudji
- [62] *Mécanique I*, J.P. Faroux : de façon assez surprenante, le modèle de Bohr y est traité très clairement
- [114] *Panorama de la physique*, G. Pietryk

♣ Pré-requis

Notions de fonction d'onde et de photon
Corde de Melde et physique des ondes

♣ Idées à faire passer

La quantification vient du confinement
Ce n'est pas une propriété quantique, la propriété quantique est la dualité onde/corpuscule

♣ Plan

Introduction

« Quantique » supposerait quantification, pourtant on ne l'a pas vu apparaître dans les postulats.

1. Mise en évidence de la quantification

1.1. Résultats expérimentaux

[29] 🐛 **Manip** : spectre d'une lampe au mercure. Formule de Ritz (termes spectraux). Interprétation en termes de photons : quantification des niveaux d'énergie.
Confirmation : expérience de Franck et Hertz, les atomes rayonnent une fréquence appartenant à leur spectre.
Conclusion : les niveaux d'énergie atomiques sont quantifiés.

1.2. Tentative d'interprétation semi-classique : l'atome de Bohr

[62] Condition de quantification à la main qui n'a pas de justification physique, mais on retrouve bien les constantes. Pour aller plus loin, il faut tenir compte de la nature quantique des électrons.
[33] Critique du modèle de Bohr : inégalités de Heisenberg, la notion de trajectoire n'a pas de sens, seulement densités de probabilité de présence dans tout l'espace.

2. Confinement et quantification

2.1. Électron dans un puits de potentiel infini

[8, 33] Idée : description ondulatoire de la matière, fct d'onde. Résoudre le problème du puits infini.
Analogie avec la corde vibrante (même quantification du vecteur d'onde, ensuite la relation de dispersion diffère).
Conclusion : c'est le confinement qui est à l'origine de la quantification de l'énergie.

2.2. Électron dans un puits de potentiel fini

[8, 33] Allure du potentiel. Distinguer état lié/état de diffusion.
Ondes planes/évanescents selon le milieu, conditions de passage à justifier. Donner le résultat pour un état lié.

2.3. Application aux hétérostructures à semi-conducteurs

[114] Modéliser le système : c'est le cas que l'on vient de traiter. Parler du principe de Pauli pour remplir les niveaux.

3. Conséquences

3.1. Atome d'hydrogène

[8, 33] Poser le potentiel effectif, barrière centrifuge (dépend du moment cinétique). Séparation des variables.
« On peut résoudre le problème du confinement » : énergies quantifiées pour chaque valeur de ℓ .
Donner le spectre en énergie et l'allure de quelques fonctions d'onde sur transparent.

3.2. Couleur des ions

[7] Première partie du problème.

3.3. Vers la physique des solides

Commenter le fait qu'élargir le puits abaisse les niveaux d'énergie par délocalisation.

Solides : on délocalise les électrons au maximum. Ouvrir vers l'effet tunnel qui couple les puits entre eux.

Conclusion

Ouvrir vers la molécule/le solide avec l'intérêt de la délocalisation.

LP44 : Effet tunnel. Applications.

♣ Bibliographie

- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant : attention, l'ammoniac est dans deux chapitres différents
 [33] *Mécanique quantique*, tome I, C. Cohen-Tannoudji
 [98] *Le microscope à effet tunnel*, BUP 699, décembre 1987, B. Leroy
 [99] *Quantique – Rudiments*, J.M. Lévy-Leblond
 [102] *Effet tunnel : quelques applications*, BUP 734, mai 1991, C. Matta

♣ Pré-requis

Fonctions d'onde
 Équation de Schrödinger

♣ Idées à faire passer

L'effet tunnel, ça marche pour de vrai
 C'est une conséquence directe des aspects ondulatoires

♣ Plan

Introduction

Présentation qualitative de l'effet, impossible pour une particule classique

1. L'effet tunnel [8, 99]

1.1. Position du problème

Rappels : fonction d'onde, équation de Schrödinger, une particule = un paquet d'onde, linéarité donc ondes planes.

Poser la barrière carrée, l'équation de Schrödinger dans les trois zones, la forme des solutions et les relations de continuité. Justifier proprement les relations de continuité.

Faire un schéma pour montrer que l'onde évanescence couple les deux milieux. Discuter l'influence de κ comme (inverse de) longueur typique d'atténuation.

1.2. Probabilité de transmission

Définition, justifier que c'est calculable, donner le résultat général, et commenter en fonction de κ .

1.3. Approximation de la barrière épaisse

Faire proprement le DL, et commenter. Donner des ODG.

2. Microscope à effet tunnel [98]

C'est une application directe. Donner l'allure du potentiel, l'intérêt de la polarisation de l'échantillon. ODG. Justifier la résolution verticale et latérale. Montrer une image.

3. Modèle de Gamov de la radioactivité α [102, 99]

3.1. Résultats expérimentaux et modélisation

Rappel de l'équation de désintégration, temps de demi-vie, temps de vie moyen.

Forme du potentiel et approximations.

3.2. Temps de demi-vie

Calcul de $t_{1/2}$ en fonction de T proba de transmission tunnel

3.3. Calcul de la probabilité de transmission

On fait le calcul, et on retrouve les résultats expérimentaux.

4. Molécule d'ammoniac [8, 33]

À ajuster en fonction du temps restant.

4.1. Modélisation

Partir d'un fait expérimental : NH_3 n'a pas de moment dipolaire.

Présenter le modèle : particule fictive, potentiel, puits carré.

4.2. Résolution

Donner les résultats et montrer les courbes en expliquant.

4.3. Battements quantiques

Donner les fonctions droite et gauche, évolution dans le temps, battements quantiques. Interpréter l'absence de moment dipolaire.

Conclusion

Analogie avec la réflexion totale frustrée, liée à la nature ondulatoire de la matière. Ouvrir sur la liaison chimique, ou la cohésion cristalline.

♣ Remarque

La leçon a été testée, et présentée à l'oral. Elle est un peu longue, ce qui nécessite d'aller assez vite sur la partie 1, et de ne pas être trop bavard sur l'ammoniac.

LP45 : Le noyau : stabilité, énergie. Applications.

♣ Bibliographie

[50] *Physique Terminale S*, programme 2002, A. Durupthy

[85] *Ondes, optique et physique moderne*, cours de physique tome 3, D. Halliday

[141] *Physique subatomique : noyaux et particules*, L. Valentin : livre de référence, toute la leçon ou presque est dedans

♣ Pré-requis

Radioactivité Terminale S

Physique atomique

♣ Idées à faire passer

Le noyau est un état lié, et a donc une énergie de liaison qu'on peut exploiter par des transformations nucléaires qui vont vers un noyau plus stable

Les modèles de noyaux se font surtout en interprétant des résultats expérimentaux

♣ Plan

Introduction

Rappeler les constituants du noyau et la notation symbolique A_ZX . Définir isotope et isobare.

1. Description du noyau

1.1. Mise en évidence expérimentale : Rutherford

Présenter brièvement le modèle de Thomson.

Présenter le dispositif, la valeur de l'angle de déviation (éviter un calcul de section efficace).

Montrer une courbe expérimentale : globalement peu de déviations mais événements rares.

Conclusion : il existe un noyau, et ODG de sa taille.

1.2. Rayon nucléaire

Généralité de la méthode de diffusion. Montrer des courbes, conclure en $r = r_0 A^{1/3}$.

1.3. Désintégrations radioactives

[50] Rappeler rapidement les transformations radioactives en ajoutant les neutrinos et le rayonnement γ . Montrer et commenter la ligne de stabilité (diagramme $N - Z$).

2. Énergie de liaison

2.1. Résultats expérimentaux

Définir proprement le défaut de masse et l'énergie de liaison : signature de la plus grande stabilité du noyau par rapport à ses constituants séparés. Montrer et commenter la courbe d'Aston.

[à savoir] Interactions mises en jeu dans le noyau : nucléaire, électromagnétique, gravitationnelle. Donner des ODG, et comparer les portées.

2.2. Modèle de la goutte liquide

Tout bien expliquer et détailler. Justifier la forme de chaque terme.

2.3. Limites du modèle

Comparaison aux résultats expérimentaux. Modèle en couches. Interpréter les nombres magiques.

3. Applications

3.1. Fission : centrales nucléaires

Origine, compétition terme de surface vs. énergie coulombienne.

[85] Réalisation pratique dans les centrales.

3.2. Fusion : étoiles et ITER

Origine, rôle dans la synthèse d'éléments. Application à ITER.

3.3. Radioactivité : datation

[50] Si le temps : paraboles de B/A en fonction de Z . Retour sur la vallée de stabilité. Application à la datation.

Conclusion

Lien entre expérience et modélisation

LP46 : Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Système à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.

♣ Bibliographie

- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant : attention, l'ammoniac est dans deux chapitres différents
 [33] *Mécanique quantique*, tome I, C. Cohen-Tannoudji
 [63] *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*, J.P. Faroux
 [74] *Systèmes à deux états*, BUP 574, mai 1975, M. Gerl : contient des idées intéressantes, mais les exemples ne sont pas ceux choisis pour la leçon.
 [109] *Physique des ondes*, S. Olivier : même collection que les Gié

♣ Pré-requis

Théorèmes généraux de mécanique
 Bases de mécanique quantique

♣ Idées à faire passer

Analogies et différences ...

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : montrer le couplage sur le système masse-ressorts. En mécanique quantique, on a vu que le couplage tunnel permet une stabilisation.

1. Exemple classique : oscillateurs couplés par élasticité [63, 109]

☞ **Manip** : cette partie est à illustrer sur le système à quatre ressorts couplés, suivi par VidéoCom, où l'on bloque le ressort du milieu avec une pince. Il faut demander aux techniciens de faire du bricolage pour remplacer le ressort du milieu par un ressort moins raide. Ça permet de mieux visualiser les battements.

1.1. Présentation du problème

Deux oscillateurs harmoniques identiques, couplage par un ressort, choix des états de base.

1.2. Mise en équation

[à savoir] cf. bonus. Application du P.F.D. aux deux masses, écrire sous forme matricielle et diagonaliser.

1.3. Modes propres et battements

Montrer les modes propres, commenter l'apparition ou non de k' dans les pulsations propres. Bien définir la notion de mode propre : mode harmonique stationnaire. Relever par TF les pulsations des modes propres. Phénomène de battements à visualiser avec VidéoCom. Faire la TF et montrer qu'on retrouve les pulsations des modes propres.

1.4. Aspects énergétiques

[à savoir] cf. bonus. Transferts d'énergie d'un oscillateur à l'autre, à la fréquence de l'enveloppe des battements.

2. Exemple quantique : molécule d'ammoniac [8, 33]

2.1. Modélisation

Partir d'un fait expérimental : l'ammoniac n'a pas de moment dipolaire. Présenter le modèle : particule fictive, système à deux états.
 Équation de Schrödinger sous forme matricielle.

2.2. Résolution

Diagonaliser le hamiltonien. Etats propres symétrique et antisymétrique.

2.3. Battements quantiques

Donner les fonctions droite et gauche, évolution dans le temps, battements quantiques.
 Oscillations de Rabi, ODG de la fréquence d'inversion.
 Interpréter l'absence de moment dipolaire.

3. Analogies et différences

À faire sur transparent. Reprendre tous les résultats précédents et les mettre en parallèle.

Analogies : même méthode de résolution en modes propres, battements.

Différences : pas du tout les mêmes grandeurs.

🚫 **Attention** : il peut y avoir aussi un abaissement de pulsation en mécanique classique, cf. l'exemple du BUP.

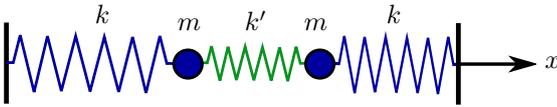
Conclusion

Vers la matière condensée et le couplage de N oscillateurs.

♣ Remarques

- ▷ J'ai présenté cette leçon en oral blanc. La longueur est correcte. Le correcteur m'avait recommandé de bien insister sur les interprétations en probabilité de présence dans la partie quantique.
- ▷ Cette leçon ne peut clairement pas se faire juste en suivant une bibliographie.

♣ Bonus



On considère deux oscillateurs harmoniques unidimensionnels identiques (masse m , ressort de raideur k) couplés par un ressort de raideur k' .

Pour simplifier on suppose qu'au repos tous les ressorts sont à leur longueur à vide ℓ_0 ou ℓ'_0 . On pose $x_1 = \ell_1 - \ell_0$, $x_2 = \ell_2 - \ell_0$.

▷ Résolution matricielle du problème d'oscillateurs couplés

Par application du PFD, les équations du mouvement s'écrivent :

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -kx_1 + k'(x_2 - x_1) \\ m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -kx_2 + k'(x_1 - x_2) \end{cases}$$

Une écriture matricielle s'en déduit alors immédiatement :

$$\frac{d^2}{dt^2} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{k+k'}{m} & -\frac{k'}{m} \\ -\frac{k'}{m} & \frac{k+k'}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

On appelle constante de coupage le terme hors-diagonale. Les deux modes propres sont les deux vecteurs propres de la matrice, les pulsations de ces modes propres les valeurs propres associées.

▷ Échanges d'énergie

L'énergie mécanique totale du système est conservée et s'écrit :

$$E = \underbrace{\frac{1}{2}m\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2}_{\text{ressort 1}} + \underbrace{\frac{1}{2}m\dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2}_{\text{ressort 2}} + \underbrace{\frac{1}{2}k'(x_1 - x_2)^2}_{\text{couplage}}$$

En utilisant les solutions des équations du mouvement, on montre facilement que chaque mode propre garde une énergie constante au cours du mouvement.

Pour montrer l'échange d'énergie entre les deux oscillateurs, il faut calculer $E_1 + E_{\text{coupl}}/2$ et $E_2 + E_{\text{coupl}}/2$. On montre alors que l'échange d'énergie se fait à la fréquence de l'enveloppe des battements.

LP47 : La molécule : stabilité, énergie. Applications.

♣ Bibliographie

- [4] *Chimie physique*, P. Atkins
- [8] *Mécanique quantique*, J.L. Basdevant
- [52] H-Prépa chimie PC-PC*, A. Durupthy
- [65] *Mécanique quantique*, R. Feynman
- [74] *Systèmes à deux états*, BUP 574, mai 1975, M. Gerl
- [79] Tec&Doc chimie PCSI, P. Grécias

♣ Pré-requis

Mécanique quantique
Physique atomique
Théorème d'équipartition

♣ Idées à faire passer

La délocalisation des électrons est à l'origine de la cohésion moléculaire
L'étude complète exacte est impossible et nécessite des approximations
Une partie de la physique est contenue dans le mouvement des noyaux

♣ Plan

Introduction

Application de la MQ et du modèle de l'atome

1. Délocalisation et partage d'électrons

1.1. Prototype : l'ion moléculaire H_2^+

Objectif : mettre en évidence le mécanisme de délocalisation d'électrons

[8, 65, 74] mais c'est surtout à faire soi-même. On prend deux puits qu'on met à une distance R fixe, et qu'on couple par un terme tunnel $A = A_0 \exp(-\kappa R)$. Écrire le hamiltonien type ammoniac. Résolution rapide, discussion : le couplage tunnel peut stabiliser le système.

1.2. Stabilité de H_2^+ : prise en compte des effets coulombiens

Objectif : montrer qu'il existe un minimum d'énergie du système à une distance R finie.

[65, 74] Sommer l'énergie de délocalisation avec le potentiel coulombien, tracer en fonction de R . Pas de minimum pour l'état antisymétrique, qui est donc antiliant. Par contre il existe un minimum pour l'état symétrique, qui est liant.

1.3. Application au benzène

[52] Résultats expérimentaux : diagramme d'énergie et longueur de liaison. Mise en évidence de la stabilité. Isomères de Kékulé.

[8] Exo corrigé. Donner le hamiltonien, dire qu'ensuite c'est pareil, il faut diagonaliser. Donner les résultats. Expliquer la stabilité.

2. Structure électronique des molécules

2.1. Approximations

[4] Approximation de Born-Oppenheimer. On l'a déjà appliquée sans le dire en partie 1 en supposant R fixe.

[79, 52] Approximation orbitalaire, théorie OM = CLOA.

2.2. Interactions de deux OA

[79, 52] Arriver au déterminant séculaire. Expliquer le principe de la résolution, donner le diagramme d'énergie avec le recouvrement et le remplir.

2.3. Exemples

[79] Interprétation du diagramme d'énergie : H_2 existe, pas He_2 . Application au paramagnétisme de O_2 . Application à la coloration des molécules.

3. Retour sur le mouvement des noyaux

3.1. Niveaux d'énergie

[52] Séparer les échelles d'énergie : niveaux électroniques déjà décrits, puis vibrationnels, puis rotationnels.

3.2. Spectroscopie infrarouge

[52] Être qualitatif, justifier le modèle d'OH. Mentionner le rôle du moment dipolaire.

3.3. Capacités thermiques

Si temps. Capacités thermiques des GP monoatomiques et diatomiques, appliquer seulement le théorème d'équipartition.

♣ Remarque

La leçon a été testée. Elle est longue. Il faut donc utiliser largement les transparents pour faire tous les schémas, et écrire un certain nombre de formules.

LP48 : Cohésion de la matière condensée.

♣ Bibliographie

- [3] *Physique de l'état solide*, N. Ashcroft
 [10] *Physique de la matière condensée*, J.J. Benayoun
 [51] H-Prépa *Chimie des matériaux inorganiques*, A. Durupthy : vieux livre vert

♣ Pré-requis

Liaison chimique
 Électromagnétisme

♣ Idées à faire passer

Origine physique de la cohésion
 On regarde des cas limites, en réalité situations intermédiaires

♣ Plan

Introduction

Définir phase condensée par rapport à phase gazeuse.

1. Diversité des mécanismes de cohésion

1.1. Énergie de cohésion

[10] p. 11. Définition formelle de l'énergie de cohésion. Extensivité. ODG.

1.2. Théorème d'Earnshaw

[à savoir] cf. bonus. Une distribution électrostatique de charge ponctuelle ne peut pas être stable. La démo est à (savoir) faire soi-même, basée sur l'extremum de potentiel. Nécessité de la mécanique quantique.

1.3. Classification de Van Arkel et Ketelaar

[à savoir] Variation continue entre les trois types de cristaux : métallique, ionique, covalent. On trace $\Delta\chi$ en fonction de $\bar{\chi}$. Les trois sommets sont Cs (métal), F (covalent) et le fluorure de césium (ionique), qui sont les extrêmes de la classification.

2. Cristaux ioniques et moléculaires

Insister sur le critère de regroupement : le mécanisme de cohésion est de la physique classique

2.1. Cristaux ioniques

[10] p. 17 + exo corrigé. Présenter le modèle 1d, calcul de l'énergie de cohésion. Généraliser à 3d.

[51] Donner un ODG de température de fusion, remonter à l'ODG de l'énergie de liaison.

2.2. Cristaux moléculaires

Justifier sa place dans le plan, et le fait qu'on n'en a pas parlé avant.

[3, 10] Ecrire le potentiel de paires, arriver à Lennard Jones en justifiant bien. Comparer aux résultats expérimentaux. On peut parler de module de compression.

Parler du cas des liquides : mêmes interactions à l'œuvre.

3. Cristaux covalents et métalliques

Insister sur le fait que le mécanisme de cohésion est maintenant quantique.

3.1. Cristaux covalents

[51] Rappeler le principe de la liaison chimique : $2 \text{ OA} \rightarrow 2 \text{ OM}$, une liante + une antiliante. Généralisation à $N \text{ OA} \rightarrow N \text{ OM}$, ce qui fait apparaître des bandes d'énergie.

Parler de graphite et diamant, parler d'anisotropie de la conductivité à relier à la délocalisation, ce qui amène au modèle du jellium.

3.2. Cristaux métalliques

[10, 3] Présenter le modèle du jellium.

Conclusion

Ouvrir vers les mécanismes de la conduction.

♣ Remarques

- ▷ La leçon a été testée. Elle est assez longue, mais pas infaisable.
- ▷ De façon très étonnante, nous n'avons trouvé la classification de VAK des cristaux . . . nulle part, à part dans nos cours de chimie.
- ▷ Attention à ne pas s'emmêler dans les interprétations de la structure métallique : chimie, bandes, électromagnétisme. Être simple : métal = délocalisation électronique donc jellium pertinent

♣ Bonus : Théorème d'Earnshaw

Préliminaire : théorème de l'extrémum de potentiel. *Il ne peut y avoir d'extrémum de potentiel électrique dans une région de l'espace vide de charge.*

Idée de la démonstration : Supposons qu'il existe un point M en lequel le potentiel électrique $V(M)$ est extrémum, et un voisinage de M qui soit vide de charge, délimité par sa surface (Σ) . Si $V(M)$ est un maximum par exemple alors sur (Σ) le champ électrique est partout sortant. Ainsi le flux de \vec{E} sur (Σ) est non nul, ce qui est contraire au théorème de Gauss puisque $Q_{\text{int}} = 0$.

Théorème d'Earnshaw. *Il n'existe pas de distribution électrostatique de charges discrètes qui soit stable sous sa seule action.*

Idée de la démonstration : On considère une charge q_0 en M_0 soumise au potentiel créé par toutes les autres charges $V_{\setminus 0}$. La distribution est stable signifie que si l'on déplace légèrement q_0 elle va revenir à sa position d'équilibre. Cela n'est possible que si le potentiel $V_{\setminus 0}$ est extrémum en M_0 . Or ceci est impossible en vertu du lemme.

LP49 : Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus.

♣ Bibliographie

- [3] *Physique de l'état solide*, N. Ashcroft
- [42] *Physique statistique*, B. Diu
- [63] *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*, J.P. Faroux et J. Renault
- [70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing
- [115] *La physique par la pratique*, B. Portelli
- [132] Dunod PC-PC* ou PSI-PSI*, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Oscillateurs harmoniques et couplage des oscillateurs
Théorème d'équipartition de l'énergie
Notions de physique des ondes

♣ Idées à faire passer

Le couplage d'une infinité d'oscillateurs permet le transport d'énergie de proche en proche
Une description continue est pertinente aux petits vecteurs d'ondes

♣ Plan

Introduction

Propriétés macroscopiques d'un solide.

1. Chaîne infinie d'oscillateurs harmoniques

1.1. Interactions dans un réseau cristallin

[3] Potentiel de Lennard-Jones, développement harmonique. Limitation (dilatation thermique). ODG de K .
Attention : il faut écrire proprement au tableau pour ne pas confondre K raideur et k vecteur d'onde ... ou noter le vecteur d'onde q

☛ **Attention** : regard critique sur les ODG qu'il y a dans les livres, qui parlent de gaz rares.

1.2. Mise en équation

[63] Poser les notations et écrire le P.F.D.

1.3. Résolution

[63] Chercher des ondes planes car invariance par translation discrète, relation de dispersion.
Zones de Brillouin. Il y a une image sur le CD montrant pourquoi la première zone de Brillouin suffit.
Discuter les cas limites. Vitesse de phase et vitesse de groupe.

2. Approximation des milieux continus

2.1. Hypothèses et démarche

[132, 63] On considère la limite $\lambda \gg a$. ODG des fréquences associées.

2.2. Équation de d'Alembert

[132, 63] Passer à la limite continue et obtenir l'équation de d'Alembert.

2.3. Lien microscopique-macroscopique

[115, 132, 63] Relier la force au module d'Young et obtenir l'équation de propagation en raisonnant sur des domaines mésoscopiques. Comparer au résultat pour un fluide. ODG et lien avec les paramètres micro.

3. Aspects énergétiques

3.1. Énergie moyenne

[70] Calculer l'énergie moyenne d'un oscillateur et retrouver l'équipartition.

3.2. Capacité thermique

[3, 42] On raisonne sur les modes propres = d.d.l. indépendants.

A haute température : théorème d'équipartition, on retrouve Dulong et Petit.

A basse température : equipartition non valable, il faut considérer la nature quantique du système.

3.3. Propagation de l'énergie

[63] Selon temps. Exercice « vitesse de l'énergie ».

Conclusion

Ouvrir sur le modèle de Debye.

LP50 : Capacités thermiques : descriptions, interprétations microscopiques.

♣ Bibliographie

[42] *Physique statistique*, B. Diu

[43] *Thermodynamique*, B. Diu

♣ Pré-requis

Thermodynamique

Ensemble canonique

Bases de mécanique quantique

♣ Idées à faire passer

Caractéristiques de C_V : extensive et positive en conséquence des principes

Démarche de construction d'un modèle microscopique

♣ Plan

Introduction

On connaît entièrement un système avec son équation d'état et les variations d'une capacité thermique avec la température.

1. Première approche

1.1. Définition

[43] Définir comme dérivée de l'entropie, et comme dérivée de l'énergie. Rappeler que l'énergie interne de thermo est l'énergie moyenne de phys stat. Mentionner que C_V doit être extensive.

1.2. Approche thermodynamique

[43] Pour des raisons de stabilité de l'équilibre, il faut $C_V > 0$ (la démo peut être faite sur transparent). Relation de Mayer.

1.3. Approche statistique dans l'ensemble canonique

[42] p. 265 à adapter. Fluctuations par développement de $P(E)$

Rappeler sans démo le théorème d'équipartition qui sert dans toute la suite

2. Capacité thermique des gaz

2.1. Gaz parfait monoatomique

[42] p. 303. Écrire le hamiltonien, justifier l'emploi du théorème d'équipartition, conclure.

2.2. Gaz parfait diatomique

[42] Justifier la séparation des degrés de liberté internes et de translation. Modélisation harmonique. Traitement complet quantique. Calcul de C_V , température caractéristique. Bien insister sur la notion de température caractéristique, parler de gel et d'activation des degrés de liberté.

Prise en compte de la rotation : température caractéristique, equipartition.

Conclure sur $C_V(T)$ pour le GP diatomique : activation successive des ddl.

3. Capacités thermiques des solides cristallins [42]

Préciser qu'on se restreint à des isolants.

3.1. Résultats expérimentaux

Montrer la courbe $C_V(T)$ pour les solides, loi de Dulong Petit

3.2. Modèle d'Einstein

Calcul. Si besoin on peut abrégé en disant « c'est des OH donc comme avant »

3.3. Modèle de Debye

A développer plus ou moins, prévoir des transparents.

Conclusion

Ouvrir vers la nécessité de prendre en compte les électrons pour les conducteurs

♣ Remarques

- ▷ Commenter à chaque fois l'extensivité et le signe
- ▷ Donner beaucoup d'ordres de grandeurs : températures de rotation, de vibration, capacité thermique massique de la glace, de l'eau, du fer ...

LP51 : Paramagnétisme, ferromagnétisme, approximation de champ moyen.

♣ Bibliographie

[26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders

[42] *Physique statistique*, B. Diu

[44] *Magnétisme – Tome 1 : Fondements*, E. du Tremolet : attention ce livre n'est pas facile du tout à lire, mais contient des choses très intéressantes

[61] *Thermodynamique*, J.P. Faroux

♣ Pré-requis

Facteur de Boltzmann et fonction de partition

Magnétisme macroscopique

♣ Idées à faire passer

Origines physiques

Complexité du phénomène et nécessité d'une modélisation

Méthode de résolution par le champ moyen

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : barreaux de Fe, Bi et Al dans l'entrefer d'un électroaimant.

1. Origine du magnétisme

1.1. Moment magnétique atomique

[44] p. 249. Modèle de Bohr : rapport gyromagnétique. Généraliser au cas quantique avec l'existence d'un moment cinétique de spin.

1.2. Origine du paramagnétisme

[44] p. 90, [61]. Moment magnétiques permanents sans couplage. Interaction avec un champ magnétique.

1.3. Origine du ferromagnétisme

[42] p. 450. Montrer que les interactions magnétiques ne suffisent pas. Expliquer l'interaction d'échange.

2. Paramagnétisme de Curie

2.1. Loi de Curie

[61] p. 261. Obtenir l'aimantation moyenne. Définir et obtenir la susceptibilité. ODG.

2.2. Désaimantation adiabatique

[42] p. 312. Calcul de l'entropie à partir de la fonction de partition totale. Interprétation qualitative : compétition entre le champ et la température.

[61] Application à la désaimantation. Les courbes sont sur le CD. À noter : intervient après refroidissement par machines thermiques puis par détente de gaz.

3. Ferromagnétisme [42]

☞ **Attention** : Diu change de convention de signe sur le moment magnétique entre para et ferro.

3.1. Modèle microscopique

Couplage entre les spins, hamiltonien d'Heisenberg. Insoluble analytiquement de façon exacte. Il faut trouver une méthode de résolution : Monte-Carlo, ou bien approchée.

3.2. Approximation du champ moyen

Définition, introduire le champ effectif. On obtient immédiatement l'aimantation à partir de 2 : équation d'auto-cohérence qu'il faut résoudre.

3.3. Transition ferro-para

☞ **Manip** : transition ferro-para au chalumeau

Résolution graphique en champ nul de l'équation d'auto-cohérence (image CD).

Susceptibilité. Limites du champ moyen : comparer les exposants critiques, bon comportement qualitatif mais échec près du point critique. Eventuellement raffinements du champ moyen (clusters etc.).

LP52 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.

♣ Bibliographie

[26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders

[44] *Magnétisme – Tome 2 : Applications*, E. du Tremolet : attention ce livre n'est pas facile du tout à lire, mais contient des choses très intéressantes

[127] *La physique par les objets quotidiens*, C. Ray

♣ Pré-requis

Électromagnétisme : vide, métaux, diélectriques

Modèle microscopique du magnétisme

♣ Idées à faire passer

ODG relatifs au ferromagnétisme

Hystérésis ferromagnétique

Large domaine d'applications

♣ Plan

Introduction

Historique, beaucoup d'applications

1. Caractérisation du ferromagnétisme

1.1. Équations de Maxwell dans un milieu magnétique

[26] Vecteur aimantation, densité volumique de courants d'aimantation. Équations de Maxwell et définition de \vec{H} . Nécessité d'une relation constitutive pour fermer le système d'équations.

1.2. Relation constitutive

[26, 45] Dia, para et ferromagnétisme. ODG de susceptibilité et exemples de matériaux. Transition ferro-para. Définition de μ_r et de μ .

1.3. Réductance magnétique

[45] Réductance magnétique. Un ferro canalise les lignes de champ. Théorème d'Ampère.

2. Aimantation d'un corps ferromagnétique [26]

2.1. Dispositif expérimental

Présenter le dispositif et justifier qu'il donne accès à \vec{H} et \vec{B} .

2.2. Cycle d'hystérésis

♣ **Manip** : choisir un rhéostat de 30Ω environ, et un tore ferrimagnétique

Tracé du cycle $M(H)$ au tableau. Champ rémanent, excitation coercitive. Matériaux durs et doux. Désaimantation et première aimantation.

2.3. Étude énergétique

Montrer que l'aire du cycle est la puissance dissipée pendant une période.

3. Applications

3.1. Le transformateur parfait

[26] Modèle du transfo parfait. Rapport de transformation des courants et des tensions. Conservation de la puissance. Discuter le choix du matériau.

3.2. Le disque dur

[127, 45] mais surtout [à savoir] Codage des bits. Lecture des données. Écriture des données.

3.3. Paléomagnétisme

[45] et [à savoir] Principe et utilisations : détermination du champ terrestre, âge des cailloux.

Conclusion

Citer d'autres applications, entre autres la MCC.

♣ Remarques

- ▷ Nous avons préparé et présenté cette leçon à la classe pendant l'année. Elle était un peu trop longue, et a été adaptée en conséquence. Les correcteurs avaient regretté un manque d'ODG, notamment dans la partie sur les applications.
- ▷ Il faut avoir les idées claires sur cette leçon, car on ne peut vraiment pas se contenter de suivre une bibliographie.

LP53 : Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.

♣ Bibliographie

- [3] *Physique de l'état solide*, N. Ashcroft
- [21] H-Prépa *Électromagnétisme 2e année*, J.M. Brébec
- [51] H-Prépa *Chimie des matériaux inorganiques*, A. Durupthy : vieux livre vert
- [83] *Propriétés électroniques des solides*, BUP 550, décembre 1972, A. Guinier : très intéressant, et concis comme il faut
- [129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé

♣ Pré-requis

Électromagnétisme : densités de charges et de courant, équations de Maxwell, force de Lorentz
 Bases de mécanique quantique
 Distribution de Fermi-Dirac

♣ Idées à faire passer

Applications et limites du modèle de Drude
 Intérêt des semi-conducteurs pour l'effet Hall

♣ Plan

Introduction

On connaît la loi d'Ohm, on veut la comprendre microscopiquement

1. Modèle de Drude de la conduction dans les métaux

1.1. Hypothèses

[129, 83, 3] Les énoncer clairement sur transparent

1.2. Calcul de la conductivité

[3] Calcul en régime permanent en utilisant la méthode probabiliste. ODG.

[129] Mentionner ou faire le calcul en régime sinusoïdal forcé.

1.3. Loi d'Ohm locale et intégrale

[21] Définir $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ comme la loi d'Ohm. Faire l'intégration pour arriver à $U = RI$.

Généraliser éventuellement aux électrolytes, voire aux plasmas, pour montrer les analogies.

2. Effet Hall

2.1. Dispositif

[21] Présenter le dispositif. 🍷 **Manip** : plaquette de Hall ENSL dans un électroaimant.

2.2. Tension de Hall

[21] sur deux chapitres différents. Expliquer physiquement le régime transitoire et calculer la tension de Hall. Montrer sur la manip. Donner des ODG.

2.3. Application : sonde à effet Hall pour la mesure de champ magnétique

Mentionner la nécessité de retourner la plaquette pour avoir une mesure précise.

3. Prise en compte d'effets quantiques

3.1. Limites du modèle de Drude

[83] Suivre les discussions expérimentales du BUP pour arriver à l'utilisation de la statistique de Fermi-Dirac et de la dualité onde-corpuscule. Arriver au modèle de Sommerfeld.

Problème des valeurs de constantes de Hall positives.

3.2. Bandes d'énergie dans les solides

[51] Expliquer qualitativement la formation de bandes. Classifier les solides à partir de la structure en bandes.

3.3. Semi-conducteurs

[83, 51] Pour éviter d'avoir à discuter de masse effective, on peut parler seulement de semi-conducteurs extrinsèques.

Conclusion

Ouverture à la supraconductivité.

♣ Remarque

Cette leçon part de très bas pour finir très haut. Je pense qu'elle aurait besoin d'être retravaillée, pour trouver une façon de présenter plus équilibrée qui prenne en compte tous les aspects du sujet et des rapports de jury.

LP54 : Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.

♣ Bibliographie

- [36] *Les lasers*, D. Dangoisse
- [63] *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*, J.P. Faroux
- [116] Cap Prépa sup, J. Pérez
- [129] Cap Prépa d'une filière de spé, V. Renvoizé
- [138] *Optique physique*, R. Taillet

♣ Pré-requis

Électronique
Mécanique du point
Optique ondulatoire

♣ Idées à faire passer

Généralité du phénomène de résonance
Intérêt du facteur de qualité

♣ Plan

Introduction

Préciser que la résonance est un comportement fréquentiel, qu'on se limite à des systèmes linéaires, et qu'on se place donc en régime sinusoïdal forcé.

1. Oscillateur à un degré de liberté : le RLC série [116]

1.1. Mise en équation

Il ne faut pas perdre de temps. Utiliser directement le régime sinusoïdal forcé. Equation sur u_C .

1.2. Réponse en tension

Diagramme de Bode, étude du module et de la phase.

1.3. Réponse en courant

Idem

1.4. Résonance en puissance

Définir alors la largeur de la résonance et le lien au facteur de qualité.

2. Oscillateurs à plusieurs degrés de liberté

2.1. Deux oscillateurs harmoniques couplés

[63] Cas masse ressort en oscillations forcées.

2.2. Corde de Melde

[129] Expliquer la résonance en termes d'interférences constructives.

☞ **Manip** : montrer les ondes stationnaires résonantes.

3. Cavités résonantes en optique

3.1. Effet Fabry-Pérot

[129, 138] Calcul de différence de marche. Expliquer la résonance en termes d'interférences constructives.

3.2. Largeur spectrale d'un filtre interférentiel

[129] Relier à la finesse de la cavité, et bien relier à la fois au cas de la corde et au cas des oscillateurs.

3.3. Largeur spectrale d'un laser

[138, 36] Interpréter là encore par un effet Fabry-Pérot.

Conclusion

Intérêt des résonances en mesure de fréquences.

LP55 : Exemples d'effets de non-linéarité sur le comportement d'un oscillateur.

♣ Bibliographie

- [36] *Les lasers*, D. Dangoisse
 [48] *Étude expérimentale des oscillateurs mécaniques*, BUP 867, octobre 2004, R. Duffait
 [62] *Mécanique I*, J.P. Faroux
 [90] *Électronique expérimentale*, M. Krob
 [131] Dunod sup, M.N. Sanz

♣ Pré-requis

Mécanique
 Électronique
 Modèle de l'électron élastiquement lié
 Analyse de Fourier

♣ Idées à faire passer

Caractéristiques du non-linéaire : enrichissement spectral, portrait de phase, bifurcation
 Linéarité est en général une limite, qui ne peut donc pas tout décrire

♣ Plan

Introduction

Le linéaire est une approximation, le non-linéaire entraîne des difficultés techniques abominables : un chemin entre les deux ?

1. Du linéaire au non-linéaire : exemple du pendule pesant [62]

1.1. Mise en équation

Le faire à partir de l'énergie. Description qualitative du mouvement.

1.2. Portrait de phase

Définir, préciser le sens de parcours. Trajectoire fermée = mouvement périodique. Mettre en avant l'insuffisance de l'OH pour tout décrire.

1.3. Perte d'isochronisme

Donner la formule de Borda (dans les exos).

[48] ✂ **Manip** : montrer la perte d'isochronisme par une acquisition sous Synchronie.

2. Influence d'un potentiel anharmonique

2.1. Enrichissement du spectre des oscillations libres

✂ **Manip** : le faire constater sur une acquisition.

[62] Faire le développement perturbatif dans le cas faiblement non linéaire.

🚫 **Attention** : un terme est « subtilement oublié »

2.2. Régime forcé : génération de seconde harmonique en optique non-linéaire

[à savoir] cf. bonus, avec [36] pour l'idée. Modèle de polarisation non-linéaire. Considérer une seule fréquence excitatrice. Le forçage du terme d'ordre 1 en ε est différent. Expliquer la génération d'harmoniques en optique non-linéaire.

2.3. Bifurcation

[131] exo référentiel non galiléens. Masse fixée sur un cerceau en rotation. Tracer la courbe d'énergie potentielle et le diagramme de bifurcation.

3. Influence d'une dissipation non-linéaire : exemple de l'oscillateur de Van der Pol [90]

3.1. Présentation

Montrer le circuit, donner l'équation et expliquer pourquoi il va y avoir des oscillations.

3.2. Cycles limites

Montrer expérimentalement sur le portrait de phases. Refaire un diagramme de bifurcation.

♣ Bonus : Principe de la génération de seconde harmonique en optique non-linéaire

On considère dans un modèle classique le mouvement d'un électron autour d'un noyau, soumis à un champ excitateur intense $\vec{E} = E \cos(\omega t) \vec{e}_x$. Cet électron est soumis à une force de rappel de la part du noyau, dérivant d'un potentiel $V(\vec{r})$, et on modélise les phénomènes dissipatifs par une force $\vec{F}_{\text{dis}} = -\gamma m \vec{r}'$. Le PFD appliqué à l'électron dans le référentiel du noyau s'écrit $m \vec{r}'' = -\gamma m \vec{r}' - \text{grad} V - e \vec{E}$. On s'intéresse à la projection sur l'axe x :

$$m\ddot{x} + \gamma m\dot{x} + \frac{\partial V}{\partial x} = -eE \cos \omega t$$

Le champ est fort, et le potentiel ne peut plus être pris comme harmonique. Il s'écrit :

$$V(x) = \frac{1}{2} m \omega_p^2 x^2 + \frac{1}{3} m \alpha \varepsilon x^3 + \underbrace{\frac{1}{4} m \beta \varepsilon' x^4}_{\text{négligé}} + \dots$$

Ici α est la constante d'anharmonicité (dimensionnée), et $\varepsilon \ll 1$ est le paramètre perturbatif (sans dimension) quantifiant la faiblesse de l'anharmonicité. On a $\alpha \neq 0$ seulement dans certains cristaux à structure non-centrosymétrique, qui brise la parité du potentiel.

On fait un développement perturbatif de x par rapport à ε : $x = x_0 + \varepsilon x_1 + \varepsilon^2 x_2 + \dots$. Les équations du mouvement s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \text{(ordre 0)} \quad \ddot{x}_0 + \gamma \dot{x}_0 + \omega_p^2 x_0 &= -\frac{e}{m} E \cos \omega t \\ \text{(ordre 1)} \quad \ddot{x}_1 + \gamma \dot{x}_1 + \omega_p^2 x_1 &= -\alpha x_0^2 \end{aligned}$$

A l'ordre 0, l'équation est celle d'un OH amorti en régime sinusoïdal forcé à la pulsation ω , et la solution s'écrit donc : $x_0 = X_0 \cos(\omega t + \phi_0)$.

A l'ordre 1, l'équation est celle d'un OH amorti en régime forcé par $-\alpha x_0^2 = -\frac{\alpha X_0^2}{2} [1 + \cos(2\omega t + 2\phi_0)]$, d'où :
 $x_1 = -\frac{\alpha X_0^2}{2\omega_p} + X_1 \cos(2\omega t + \phi_1)$.

Ainsi, la polarisation de l'échantillon qui vaut $-nex$ (modèle de polarisation électronique, n est la densité volumique d'électrons) va présenter une composante oscillant à 2ω . Le champ rayonné par l'échantillon aura donc aussi une composante à 2ω . On observe ici la *génération de seconde harmonique*, réalisée quotidiennement par exemple dans la plupart des pointeurs lasers verts. Ce sont en fait des lasers infra-rouge, donc la fréquence est doublée pour arriver dans le domaine du vert.

Conclusion : Une non-linéarité dans la réponse d'un oscillateur forcé entraîne un enrichissement du spectre de la réponse par rapport au spectre du forçage.

LP56 : Illustration de l'intérêt de la notion de symétrie dans différents domaines de la physique.

♣ Bibliographie

- [129] Cap Prépa PC-PC*, V. Renvoizé
 [131] Dunod sup, M.N. Sanz
 [132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz
 [137] *La symétrie*, J. Sivardière
 [139] *Dictionnaire de physique*, R. Taillet

♣ Pré-requis

Mécanique des solides et fluides
 Électromagnétisme
 Thermodynamique

♣ Idées à faire passer

Les symétries imposent des contraintes sur les lois physiques
 Les symétries permettent de simplifier drastiquement un problème

♣ Plan

Introduction

Large usage des symétries pour simplifier les problèmes

1. Principe de Curie

1.1. Notion de symétrie

[139] Définition. Exemples : symétries d'un carré ou d'un cercle.

1.2. Énoncé du principe de Curie

[137] Énoncer le principe. Mentionner qu'il n'y a pas de réciproque. Insister sur l'unicité de la solution.

♣ **Manip** : diffraction d'une lumière laser par une fente verticale, un trou circulaire, et une grille.

Exemple : diffusion thermique dans un mur en régime stationnaire. Discuter les symétries du problème, à opposer aux symétries du système. Ainsi la conductivité thermique est invariante par translation dans le mur, mais pas la température, en raison des CL imposées.

1.3. Vecteurs polaires et vecteurs axiaux

[139, 137] Définition vecteur polaire, vecteur axial.

Exemple : champs électrostatique et magnétostatique. Calcul dans le cas d'un fil infini chargé uniformément ou parcouru par un courant uniforme.

Nature des opérateurs produit scalaire, produit vectoriel, $\overrightarrow{\text{grad}}$, div , rot .

2. Lois de conservation

Exemple du problème képlerien à deux corps. Bien justifier les invariances avec le principe de Curie.

♣ **Attention** : Quand on parle d'invariance, c'est bien celles du potentiel qu'il faut considérer et pas celles des forces (cf. Noether qui parle de lagrangien, cf. la chute libre où ça marcherait clairement pas)

2.1. Invariance par translation et conservation de l'impulsion

$V = V(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$ donc invariance par translation.

2.2. Invariance par rotation et conservation du moment cinétique

$V = V(|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|)$ donc invariance par rotation.

2.3. Invariance temporelle et conservation de l'énergie

V est indépendant du temps et le système est conservatif, donc énergie conservée.

3. Symétries d'échelle

3.1. Notion de dimension

[137] Invariance par changement d'unité.

Exemple simple : période du pendule. Une grandeur temporelle (la période) doit être invariante sous un changement d'unité d'espace.

3.2. Adimensionnalisation

[129] Adimensionnaliser Navier-Stokes, faire sortir Re . Deux écoulement sont identiques s'ils ont le même Re . Application aux maquettes d'écoulement.

4. Brisure de symétrie

4.1. Bifurcation mécanique

[131] Masse sur un cerceau en rotation. Commenter le lien avec le principe de Curie.

4.2. Transition de phase

[132] en exercice. Transition ferro-para, donner l'énergie libre de Landau. Lien avec la bifurcation.

Rq : on peut interpréter ça comme une brisure d'ergodicité.

Deuxième partie
Leçons de chimie

LC01 : Solutions électrolytiques : mise en solution d'espèces ioniques ou moléculaires. (L)

♣ Bibliographie

[56] *Chimie 1ère S*, collection Durupthy

[87] *Chimie 1ère S*, collection Sirius

[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Quantité de matière

Modèle de Lewis

Classification périodique

Force de Coulomb

♣ Idées à faire passer

Existence d'interactions entre solvant et solutés

Notion de concentrations

♣ Plan

Introduction

[97] 🧪 **Manip** : conduction dans l'eau salée.

1. Mise en solution d'un solide ionique

1.1. Le solide ionique cristallin

Description sur l'exemple de NaCl.

1.2. Mise en solution

🧪 **Manip** : identification des ions (les deux).

Équation de dissolution. Les ions conduisent le courant. Autres exemples.

1.3. Saturation

[97] chap. « dissolution de composés ioniques ». 🧪 **Manip** : ajouter trop de NaCl. Définition de la solubilité.

2. Mise en solution d'espèces moléculaires

2.1. Espèces moléculaires

Rappel : liaison covalente, représentation de Lewis et de Cram.

2.2. Mise en solution d'un gaz : exemple de HCl

[97] 🧪 **Manip** : expérience du jet d'eau. ⚠️ **Attention** : l'expérience peut être dangereuse !

Équation de dissolution. Faire les tests caractéristiques au papier pH et au nitrate d'argent.

2.3. Mise en solution d'un liquide : exemple de H₂SO₄

[97] 🧪 **Manip** : mise en solution et tests caractéristiques au papier pH et au chlorure de baryum).

3. Principe et étapes de la dissolution

3.1. L'eau, une molécule polaire

Electronégativité, molécule polaire.

3.2. Dissolution d'un solide ionique

[87] Détailler les 3 étapes.

3.3. Dissolution de composés moléculaires

[87] Détailler.

3.4. Effets thermiques

[56] mais surtout à savoir. Dissociation endothermique, solvatation exothermique, faire le diagramme d'énergie.

4. Concentration d'une solution électrolytique

4.1. Concentration molaire en soluté apporté

4.2. Concentration effective des ions en solution

4.3. Conductimétrie

A présenter rapidement : conductance, conductivité et constante de cellule, conductivités molaires ioniques.

[56] 🧪 **Manip** : TP sérum physiologique → courbe d'étalonnage et détermination d'une concentration inconnue.

Conclusion

Parler de précipitation (que l'on a montré sur les tests caractéristiques).

LC02 : Le squelette carboné des hydrocarbures : relation entre structure et propriétés (nomenclature exclue). (L)

♣ Bibliographie

[5] BUP 700, *Oxydation des hydrocarbures : dégradation-combustion-sécurité*, G. Avond, février 1988 : lecture intéressante, en omettant la partie sur les extincteurs

[56] *Chimie 1ère S*, collection Durupthy

[147] *Chimie 1ère S*, collection Galiléo

♣ Pré-requis

Représentation de Lewis

États de la matière

Énergie de liaison

♣ Idées à faire passer

Les propriétés macro d'un composé sont dues à la structure micro des molécules qui le constituent

♣ Plan

Introduction

Lien entre la structure micro et les propriétés ?

1. Structure microscopique

1.1. Origine des hydrocarbures

Définition. Hydrocarbures fossiles + issus du vivant.

1.2. Représentations

Formules brutes, développée, semi-développée, topologique. ☞ **Manip** : modèles moléculaires.

Exemples à présenter : méthane, éthène, cyclohexane, benzène.

1.3. Classification

Linéaire/ramifié. Saturé/insaturé.

Isomères. Montrer sur les modèles moléculaires que l'on peut tourner librement autour d'une simple C–C, mais pas autour de C=C.

2. Propriétés macroscopiques

2.1. Réactivité

[à savoir] ☞ **Manip** : test caractéristique des alcènes à l'eau de brome. On compare le pentane à l'hexène.

Écrire le bilan réactionnel. Forte densité électronique sur la C=C donne bonne réactivité.

Les hydrocarbures saturés sont stables.

2.2. Densité, solubilité

On travaille sur l'heptane et le pentane.

[à savoir] cf. bonus. ☞ **Manip** : solubilité + montrer leur miscibilité. Mentionner que « les semblables dissolvent les semblables ». Exemple : marée noire.

[à savoir] ☞ **Manip** : mesure de la masse volumique de l'heptane et du pentane. Le protocole est trivial : remplir et peser une fiole jaugée de 50 mL.

2.3. Température de changement d'état

[56] ☞ **Manip** : distillation d'un mélange heptane/pentane. Vérifier l'indice au réfractomètre et la température.

[147] Influence de la longueur de la chaîne et des ramifications sur T_{eb} . Interprétation : plus ou moins d'interactions entre chaînes.

2.4. Production d'énergie par combustion

[56] chap. « effets thermiques » à la fin. Définir une réaction de combustion. Énergies de liaison. O.D.G.

3. Applications industrielles

3.1. Le traitement du pétrole

[147] Pétrole brut, distillation fractionnée.

3.2. Carburants

[56] chap. à la fin. Essence : moteur, on n'utilise pas l'octane (qui pourtant libère le plus d'énergie) à cause de l'auto-allumage.

Carburants utilisés : alcanes ramifiés et dérivés du benzène. On les fabrique par reformage catalytique (isomérisation, cyclisation, déshydrocyclisation, craquage catalytique).

3.3. Industrie chimique

Production du benzène et de ses dérivés par vapocraquage.

3.4. Polymères

[56] Définition, polyaddition, exemples, utilisations.

Conclusion

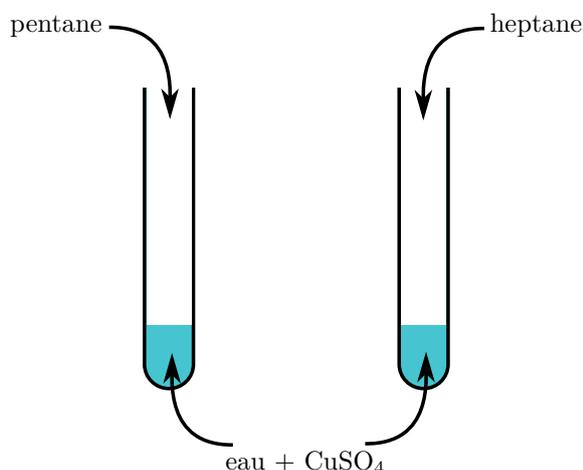
On peut rajouter des groupes fonctionnels.

♣ Attention !

Ne surtout pas demander de l'hexane, qui est très toxique. Prendre à la place du pentane et de l'heptane, ou du pentane et du cyclohexane.

♣ Bonus

▷ Expérience de solubilité et miscibilité



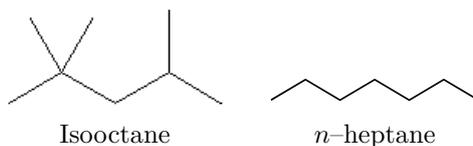
Pour que l'expérience soit plus visible, on prend comme phase aqueuse une solution de sulfate de cuivre. On peut également prendre une solution de diiode, mais il vaut mieux éviter le permanganate qui pourrait créer des oxydations non souhaitées.

On ajoute les liquides organiques, et on observe deux phases : la phase aqueuse, colorée, en bas et la phase organique, incolore, en haut. On en déduit que les liquides organiques et l'eau ne sont pas miscibles.

Puis on mélange les deux tubes et on agite. On observe deux et non pas trois phases. On en déduit que les deux composés organiques sont miscibles l'un à l'autre.

▷ Indice d'octane

L'indice d'octane mesure la résistance d'un carburant à l'auto-allumage. Un carburant a un indice d'octane de 95 si il se comporte du point de vue de l'auto-allumage comme un mélange à 95% d'isooctane et de 5% de *n*-heptane



LC03 : Molécules de la santé : acides aminés et peptides. (L)

♣ Bibliographie

- [6] BUP 625, *Acides aminés et liaison peptidique*, H. Baroux, juin 1980
 [15] *Chimie organique expérimentale*, M. Blanchard
 [35] Hatier, *Chimie Terminales C-D-E*, A. Cunningham
 [59] BUP 714, *Chromatographie sur papier et électrophorèse d'acides aminés*, O. Durupthy, mai 1989
 [80] *Chimie organique*, P. Grélias : livre jaune, même collection que les Gié. Il contient tout le contenu de la leçon, présenté de façon plus détaillée et rigoureuse que dans les livres de terminale technologique.
 [113] Nathan *Physique Chimie Terminale SMS*, C. Perraudin
 [122] BUP 847, *L'aspartame : un édulcorant intense*, V. Prévost, octobre 2002
 [142] Bordas, *Physique Chimie Terminale ST2S*, R. Vento

♣ Pré-requis

Acido-basicité
 Bases de chimie orga

♣ Idées à faire passer

La nature fait de la chimie de façon hyper performante
 On peut comprendre tout ça avec les outils du chimiste

♣ Plan

Introduction

Quand on chauffe une protéine, ça donne des briques élémentaires : les acides aminés. Mentionner la bio.

1. Les acides aminés

1.1. Présentation

[113] Définition. Résidu qui change les propriétés. Acides aminés essentiels.

1.2. Représentation de Fischer

[35, 113] Définition, nomenclature. Chiralité.

1.3. Les acides aminés dans l'eau

[35, 59] Notion de zwitterion. Diagramme de prédominance. pH isoélectrique. Donner les exemples des AA qu'on va électrophorèser.

1.4. Identification des acides aminés présents dans le jus d'orange

[59] ☞ **Manip** : électrophorèse des AA du jus d'orange. ⚠ **Attention** : il y a des modifications au protocole.

2. Assemblage d'acides aminés : la liaison peptidique

2.1. Étude de l'aspartame : un dipeptide

[122] Présenter la molécule d'aspartame. Montrer la liaison peptidique. Introduire la fonction amide.

☞ **Manip** : hydrolyse de l'aspartame. On récupère deux AA qu'on identifie par CCM.

2.2. Enchaînement de deux acides aminés

[35] Définir la réaction de condensation comme réaction inverse de l'hydrolyse de l'aspartame.

Bien montrer la diversité des résultats possibles. Stratégies de synthèse pour choisir les groupes qui réagissent.

3. Polypeptides : les protéines

3.1. Définition et test caractéristique

[113] Définition

[15] ☞ **Manip** : test au biuret. Attention à ne pas faire cuire le blanc d'œuf, on a l'air ridicule et c'est pénible à nettoyer.

3.2. Structure des protéines

[6, 113, 35] Présenter les structures primaire, secondaire, tertiaire. Relation structure-propriétés.

3.3. Rôle biologique des protéines

[113] Messagers, catalyseurs, soutien des tissus, stockage et transport de O₂.

Conclusion

Ouvrir sur la polycondensation du nylon

♣ Remarques

- ▷ Le protocole d'électrophorèse du BUP n'est pas optimal.
- ▷ Encore plus qu'ailleurs, il faut absolument commencer la préparation par démarrer les manips!
- ▷ Dès qu'on manipule des AA on utilise des gants, et on fait attention à ne pas les toucher avant : on a plein d'AA sur les mains et ça pourrait toutes les manips.
- ▷ Penser à la catalyse enzymatique, dont la très grande spécificité permet la synthèse biologique ultra-précise.

LC04 : Principe et applications de la spectrophotométrie. (L)

♣ Bibliographie

- [58] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Durupthy
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [100] BUP 801, *Expériences portant sur la notion d'indicateur coloré*, R. Mahé, février 1998 : la référence est donné dans le JFLM, pas besoin de l'apprendre
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède
 [106] BUP 784, *Spectroscopie pratique dans le domaine du visible et de l'ultraviolet*, R. Meyer, mai 1996 : pas pour le jour J, mais intéressant à lire en préparant la leçon
 [140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino : il y a quasiment tout ce qu'il faut dedans.

♣ Pré-requis

Notion de spectre lumineux
 Principe d'un dosage par étalonnage
 Indicateur coloré
 Cinétique chimique

♣ Idées à faire passer

Intérêt et domaine d'application de la spectrophotométrie

♣ Plan

Introduction

La couleur des solutions varie en fonction de la concentration : on voudrait l'exploiter.

1. Principe de la spectrophotométrie [140]

1.1. Couleur d'une solution

[97] ☞ **Manip** : spectre de la lumière blanche, spectre d'absorption d'une solution de KMnO_4 . Couleurs complémentaires.

1.2. Le spectrophotomètre

Décrire l'appareil en faisant le lien entre le dispositif de démonstration et l'appareil réel.

1.3. Absorbance

Définitions : transmittance, absorbance. Commenter échelle log, limite des solutions trop concentrées.

☞ **Manip** : montrer le spectre de KMnO_4 .

1.4. Loi de Beer-Lambert

Revenir sur l'influence de la longueur d'onde. Retourner la cuve sur la manip de démonstration. Courbe d'étalonnage pour montrer l'influence de la concentration. Énoncé de la loi, limitations. Additivité des absorbances.

2. Utilisations de la spectrophotométrie

2.1. Dosage par étalonnage

[97, 58] ☞ **Manip** : dosage du fer dans le vin. ☹ **Attention** : ajouter seulement quelques gouttes d'eau oxygénée, et pas 2 mL (sinon ça chauffe beaucoup et on peut plus rien faire).

2.2. Mesure du pK_a d'un indicateur coloré

[97, 100] ☞ **Manip** : mesure du pK_a du bleu de bromophénol. Faire le traitement complet. Comparer à la valeur théorique de l'article du BUP.

2.3. Suivi cinétique

[105] ☞ **Manip** : réaction entre I^- et $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$. Relier explicitement l'absorbance à l'avancement (seul I_3^- absorbe), et mesurer un temps de demi-réaction et une vitesse.

Conclusion

Ouvrir sur la spectroscopie comme outil d'analyse des molécules.

LC05 : Equilibre chimique en solution aqueuse : cas des couples acido-basiques. (L)

♣ Bibliographie

- [57] *Chimie Terminale S*, collection Durupthy
 [94] *Chimie Terminale S*, collection Microméga
 [140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino

♣ Pré-requis

Couples acide/base
 Bilan de matière
 Cinétique

♣ Idées à faire passer

Notion de pH et ses propriétés (notamment grandeur logarithmique)
 Notion d'équilibre chimique, et grandeurs caractéristiques

♣ Plan

1. Rappels sur les réactions acide-base

1.1. Définitions

[140] Définir acide et base au sens de Brønsted. Couple acide/base, demi-équations. Réaction acide-base. Notion d'amphotère.

1.2. Le pH et sa mesure

[140] Définition en ajoutant le c° . Mesure au pH-mètre. Donner des valeurs pour bien mettre en avant le fait que c'est logarithmique : multiplier par 2 la concentration change assez peu le pH !

[57] Discuter l'incertitude sur une mesure de concentration par pH.

2. Notion d'équilibre chimique

2.1. Mise en évidence du caractère non-total d'une réaction

[140] ☞ **Manip** : HCl dans l'eau → total, acide éthanoïque → non total.

2.2. Mise en évidence du caractère réversible d'une réaction

[140] ☞ **Manip** : encore sur l'exemple de l'acide éthanoïque

2.3. L'équilibre chimique

[57] Définition. Equilibre dynamique.

2.4. Grandeurs caractéristiques de l'équilibre

Taux d'avancement. Quotient de réaction (« par convention, le solvant et les solides n'apparaissent pas dans l'écriture du quotient de réaction »).

[94] p. 83. ☞ **Manip** : mesure du pK_a de l'acide éthanoïque. Montrer que Q_r est constant à l'équilibre. Définir la constante d'équilibre. Insister sur K° ne dépend que de T .

3. Application aux réactions acido-basiques [57, 140]

3.1. Autoprotolyse de l'eau

Définir K_e , définir solution acide et solution basique.

3.2. Constante d'acidité d'un couple acide-base

Réexploiter la manip. Parler de diagramme de prédominance et de diagramme de distribution.

3.3. Constante d'équilibre d'une réaction d'acido-basité

Introduire à partir du diagramme de prédominance. Prendre un exemple et faire un calcul. Faire remarquer que lorsqu'on somme des réactions on multiplie des constantes d'équilibre.

3.4. Force des acides et des bases

Définir acide fort et acide faible, base forte et base faible en utilisant le taux d'avancement.

Conclusion

Insister sur la généralité de l'équilibre. Poser la question du sens d'évolution.

LC06 : Indicateurs colorés acido-basiques : étude, choix pour un dosage acide-base. (L)

♣ Bibliographie

[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

[100] BUP 801, *Expériences portant sur la notion d'indicateur coloré*, R. Mahé, février 1998 : la référence est donné dans le JFLM, pas besoin de l'apprendre

[104] *Chimie Terminale S*, collection Mesplède

[140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasio

♣ Pré-requis

Équilibres acide/base

Dosages

Spectrophotométrie

♣ Idées à faire passer

Indicateur coloré = couple acide/base dont les deux formes ont des couleurs différentes

L'objectif d'un dosage colorimétrique est le repérage de l'équivalence en utilisant le virage de l'IC

♣ Plan

Introduction

Longueur de la méthode pH-métrie, qui demande de nombreux points

1. Notion d'indicateur coloré

1.1. Définition

[104, 140] Définition. Cas monocoloré/bicoloré.

1.2. Exemple : le BBT

[97] p. 145. ☞ **Manip** : montrer la couleur des formes acide et basique et la teinte sensible.

2. Mesure du pK_a d'un indicateur

2.1. Zone de virage

[104, 140, 100] Diagramme de prédominance, zone de virage à définir et à relier au pK_a (avec des précautions : dépend des absorptions relatives des 2 espèces).

2.2. Étude du bleu de bromophénol

[97, 100] ☞ **Manip** : étude par spectrophotométrie. Définir le point isobestique. Mentionner l'écart à la ZV.

2.3. Estimation du pH d'une solution

☞ **Manip** : test sur une solution « inconnue ». Parler de papier pH.

3. Suivi colorimétrique d'un titrage acido-basique

3.1. Rôle de l'indicateur

But : repérer l'équivalence. Bien distinguer point équivalent et indicateur de fin de titrage.

L'indicateur va être dosé en même temps : faible quantité. Pour qu'un couple acide-base soit utilisable comme IC, une des deux formes doit être *très fortement* colorée pour qu'on puisse l'utiliser en faible concentration, tout en voyant bien le changement de couleur.

3.2. Choix de l'indicateur

Présenter le choix de l'indicateur.

[97] p. 141. ☞ **Manip** : dosage de l'acide éthanoïque par la soude. Changer le protocole : faire le deuxième dosage uniquement, mais avec deux IC différents. Montrer les volumes et pH de début et fin de titrage.

3.3. Incertitudes

On peut être aussi précis qu'en pH-métrie, i.e. à la goutte près. Facteur limitant : amplitude du saut de pH. Mentionner le cas des espèces colorées (colorimétrie souvent impossible).

Conclusion

Indicateurs autres que acido-basiques.

LC07 : Cinétique de réactions (catalyse exclue). (L)

♣ Bibliographie

[94] *Chimie Terminale S*, collection Microméga, sans oublier de demander le CD qui va avec

[105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède

[140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino

♣ Pré-requis

Oxydoréduction

Bilan de matière

Spectrophotométrie

Conductimétrie

Dosages

♣ Idées à faire passer

Existence de la cinétique

Principe d'un suivi : on mesure une grandeur physique reliée à l'avancement de façon simple

Modèle microscopique

♣ Plan

Introduction

Exemple de la vie courante (les fruits pourrissent), et problématique industrielle

1. Réactions lentes et rapides

1.1. Mise en évidence expérimentale

[94, 140] ✂ **Manip** : montrer une réaction rapide ($\text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$) et une réaction lente ($\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$).

1.2. Méthodes de suivi cinétique

[à savoir] Expliquer le principe : on veut une grandeur mesurable et facile à relier à l'avancement. Méthode chimique donc par dosage, problèmes que ça pose. Méthodes physiques : spectrophotométrie et conductimétrie.

2. Réalisation et analyse d'un suivi cinétique

[105] ✂ **Manip** : hydrolyse de tBuCl, qui sert d'exemple pour toute cette partie.

2.1. Étude expérimentale

Bien expliquer le protocole. Bien montrer le lien entre la grandeur mesurée et l'avancement.

2.2. Vitesse de réaction

[140] Définition. Mesure à partir des tangentes. Diminution de v lorsque la réaction avance.

2.3. Temps de demi-réaction

[140] Définition. Mesure. Interprétation comme un temps caractéristique de la cinétique qui permet de comparer entre elles deux réactions.

3. Facteurs influençant la cinétique

[105] ✂ **Manip** : $\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, qui sert d'exemple pour toute cette partie.

3.1. Présentation de la réaction d'exemple

Écrire les demi-équations redox, donner la réaction. Justifier que l'absorbance est pertinente pour suivre l'avancement.

3.2. Influence des concentrations en réactifs

[140] à adapter. Montrer qualitativement dans des béchers (attention à pas être trop sale non plus : prélever des volumes à l'éprouvette), et quantitativement par suivi spectro.

3.3. Influence de la température

[140] à adapter. Juste qualitatif dans des béchers.

3.4. Autres facteurs cinétiques

[94] Lumière, présence d'un catalyseur.

4. Interprétation microscopique [94]

A illustrer avec l'animation du CD de Microméga.

4.1. Modèle microscopique de la réaction chimique

Notion d'agitation thermique et de collisions entre molécules. Chocs efficaces ou pas.

4.2. Facteurs cinétiques

Relier à la probabilité des chocs.

Conclusion

Contrôle de la cinétique et catalyse

♣ Remarque

Les considérations présentées dans cette leçon ne sont valables que pour des actes élémentaires. Ne pas le dire (évidemment!), mais l'avoir à l'esprit pour les questions.

LC08 : Catalyse et catalyseurs. Applications. (L)

♣ Bibliographie

- [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [104] *Chimie Terminale S*, collection Mesplède
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède
 [112] *Chimie Terminale S*, collection Parisi
 [140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino
 [148] *Chimie Terminale S*, collection Galiléo

♣ Pré-requis

Cinétique chimique
 Oxydoréduction
 Estérification

♣ Idées à faire passer

Caractéristiques de la catalyse
 Diversité des applications, liée à la diversité des mécanismes

♣ Plan

Introduction

Limitation des facteurs cinétiques : on ne peut pas trop chauffer sinon ça dégrade des produits, ça risque de déplacer des équilibres. Quant aux réactions dont le solvant est réactif, on ne peut pas augmenter la concentration.

1. Le phénomène de catalyse

1.1. Mise en évidence expérimentale

[97] p. 272. ☞ **Manip** : sel de Seignette. Expliquer avec le mécanisme simplifié (bilan redox)

1.2. Définition

Définir catalyseur et catalyse. Insister sur le fait qu'il n'influe pas sur K° , ne rend pas possible des transformations impossibles etc.

1.3. Spécificité de la catalyse

[105] ☞ **Manip** : déshydratation ou déshydrogénation de l'éthanol sur cuivre ou alumine dans le four fait pour.

2. Les différents types de catalyse

[112] ☞ **Manip** : dismutation de l'eau oxygénée. Écrire la réaction, dire et faire constater qu'elle est lente.

2.1. Catalyse homogène

[148] Définition. ☞ **Manip** : catalyse avec fer (III), qu'on interprète avec un bilan redox. Influence de la concentration.

2.2. Catalyse hétérogène

[148] Définition. Mécanisme de principe. ☞ **Manip** : catalyse avec Pt, importance de la surface disponible.

2.3. Catalyse enzymatique

[104] Définition. Mécanisme de Michaelis. Grande spécificité. ☞ **Manip** : navet ou steak.

3. Applications de la catalyse

3.1. Synthèse organique

[140, 104] Exemple de la synthèse de l'ammoniac et de l'estérification.

3.2. Pot catalytique

[148, 104] Présenter brièvement le principe, schéma.

3.3. Rôle des enzymes

[104] ☞ **Manip** : hydrolyse de l'amidon.

Conclusion

Comparer les différents types de catalyse. Autocatalyse.

LC09 : Estérification et hydrolyse des esters. (L)

♣ Bibliographie

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[104] *Chimie Terminale S*, collection Mesplède

[140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino

♣ Pré-requis

Cinétique

Équilibre chimique

Titrage

♣ Idées à faire passer

L'estérification est équilibrée

Opposition cinétique et thermodynamique

♣ Plan

Introduction

Application des notions connues (cinétique, équilibre) à l'étude d'une réaction industrielle.

1. L'équilibre d'estérification \rightleftharpoons hydrolyse

1.1. Les esters

Groupe caractéristique, nomenclature. Éviter l'écriture avec R et R' .

1.2. Estérification

[93] ⚡ **Manip** : ester de poire (manip qualitative, donc seulement si temps).

Définir une réaction d'estérification. Bilan réactionnel, bilan de matière.

[93] ⚡ **Manip** : réalisation complète d'une estérification. Dosage de l'acide restant pour remonter à la composition du mélange à l'état final.

1.3. Hydrolyse

Définir une réaction d'hydrolyse. Bilan réactionnel, bilan de matière.

[93] ⚡ **Manip** : réalisation complète d'une hydrolyse. Adapter les volumes pour avoir les mêmes quantités de matière que dans l'estérification. Dosage de l'acide formé.

1.4. Bilan

Caractéristiques de l'estérification : équilibre, même état final pour les deux sens. Définir K° . Rendement.

Aspects cinétiques : faire constater que c'est lent.

2. Optimisation de la réaction

2.1. Contrôle de l'état d'équilibre

Introduction d'un réactif en excès. Élimination d'un produit : le Dean Stark.

La réaction est athermique.

2.2. Contrôle de la cinétique de réaction

Chauffage, catalyse acide. Justifier a posteriori le protocole.

[93] ⚡ **Manip** : ester de poire sans acide et/ou sans chauffer (seulement si temps)

2.3. Nature des réactifs

Classe de l'alcool.

Passage à un anhydride d'acide : définition, groupe caractéristique, bilan de réaction avec un anhydride. Ça devient rapide et total. Application à la synthèse de l'aspirine.

Conclusion

Saponification, pour rendre rapide et totale l'hydrolyse

LC10 : Saponification des esters ; applications. (L)

♣ Bibliographie

- [57] *Chimie Terminale S*, collection Durupthy
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [104] *Chimie Terminale S*, collection Mesplède
 [140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasino
 [148] *Chimie Terminale S*, collection Galiléo

♣ Pré-requis

Estérification et hydrolyse acide
 Acido-basicité

♣ Idées à faire passer

Le chimiste peut contrôler l'évolution d'un système et s'en servir judicieusement
 Relation structure-propriétés sur les savons

♣ Plan

Introduction

Hydrolyse acide = lente + non totale. Est-ce qu'on peut faire mieux ? Orienter vers les applications : pour faire une synthèse on préfère une réaction totale et pas trop lente.

1. Saponification des esters

1.1. Bilan de réaction

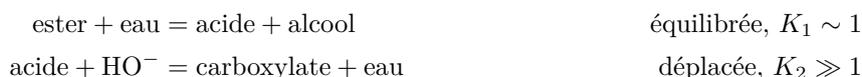
Écrire le bilan sur le cas de l'acide benzoïque, rappeler les noms des fonctions etc.

1.2. Étude expérimentale

[57] 🍯 **Manip** : saponification du benzoate d'éthyle. Bien justifier le protocole expérimental. Être super précis, c'est la partie la plus importante de la leçon. Caractérisation au banc Köfler du produit.
 Calcul détaillé de rendement : tableau d'avancement (attention à bien distinguer avancement final et maximal). Justifier qui est le réactif limitant. Mentionner rendement meilleur qu'hydrolyse acide, bien que le solide soit surement pas assez sec.

1.3. Caractéristiques de la réaction de saponification

Comparaison à l'hydrolyse acide : c'est quantitatif et rapide. Rationnalisation :



donc au bilan la réaction de saponification a pour constante $K = K_1 K_2 \gg 1$.
 Justifier a posteriori pourquoi on chauffe : problème cinétique.

2. Synthèse et propriétés des savons [104]

Le vendre comme une application de la saponification.

2.1. Fabrication des savons : saponification des corps gras

Définir les corps gras comme esters de triglycérol. Bilan de la saponification, définition d'un savon.

2.2. Structure et propriétés des savons

🍯 **Manip** : utiliser un savon commercial, changer un peu l'ordre des tests.
 Extrémités hydrophile/hydrophobe, contre-ion. Manip du poivre (aller à la pointe de couteau dans le savon solide).
 Solubilité d'un savon dans l'eau distillée, interprétation en termes de micelles. pH d'une solution d'eau savonneuse. Pouvoir moussant.
 Propriétés détergentes. On peut parler tâche grasse/sèche.
 Solubilité et dureté de l'eau (interprétation avec charge du cation ?)

3. Dosage du principe actif contenu dans un cachet d'aspirine [93]

3.1. Principe du dosage

Justifier l'intérêt d'un dosage indirect. Montrer en quoi la saponification permet un tel dosage.

Écrire l'équation de dosage, le bilan de matière, justifier pourquoi certains groupes fonctionnels « ne réagissent pas ».

3.2. Réalisation expérimentale et exploitation

🔗 **Manip** : faire le dosage¹, l'exploiter.

Commenter en rapport avec la lecture de l'étiquette, parler d'excipients.

Conclusion

[57] p. 326. Ouverture industrielle.

1. Plusieurs commentaires sur ce dosage avec la LC11, que j'ai traité sur l'aspirine.

LC11 : Synthèse et dosage d'un composé d'usage pharmaceutique. (L)

♣ Bibliographie

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[149] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Galiléo : prendre l'édition de 1997 qui contient un peu plus de choses. C'est surtout pour l'enrobage de la leçon.

♣ Pré-requis

Techniques expérimentales : chauffage à reflux, recristallisation, banc Köfler

Estérification et saponification

Dosage indirect

♣ Idées à faire passer

Le chimiste peut choisir et contrôler les conditions expérimentales pour orienter une synthèse

Illustration du processus industriel : synthèse, formulation, contrôle de qualité

♣ Plan

Introduction

Donner des chiffres sur la production et consommation de médicaments. Présenter les étapes du processus industriel. Choix de la leçon : l'aspirine.

1. L'aspirine : présentation [93, 149]

Donner des chiffres de consommation et de production d'aspirine.

Présenter l'acide acétylsalicylique. Groupes fonctionnels et réactivité.

2. Synthèse de l'aspirine [93]

2.1. Réaction de synthèse

Présenter la réaction au tableau. Justifier les conditions expérimentales qu'on va utiliser : choix d'un anhydride comme solvant, catalyse acide, chauffage.

♻ **Manip** : réaliser la synthèse, en justifiant tout le protocole. Démarrer la réaction en préparation, et ne faire que les étapes post-chauffage.

2.2. Purification par recristallisation

Rappeler le principe d'une recristallisation au tableau.

♻ **Manip** : recristalliser, en justifiant. ⚠ **Attention** : le schéma du montage de recristallisation du JFLM est faux.

2.3. Identification du produit

♻ **Manip** : mesure de point de fusion au banc Köfler + test caractéristique de l'acide salicylique par FeCl_3 (substrat de départ).

3. Dosage du principe actif contenu dans un cachet commercial [93]

3.1. Problématique

Nécessité du contrôle de qualité. Peser le cachet (environ 600 mg), lire l'étiquette (aspirine 500).

3.2. Dosage indirect

Présenter le dosage : saponification, puis dosage de l'excès de soude. Justifier pourquoi certains groupes ne réagissent pas. Intérêt du dosage indirect par rapport à un dosage direct.

♻ **Manip** : doser le mélange aspirine + soude, qui aura été préparé avant l'arrivée du jury. On fera un dosage pH-métrique en préparation au cas où et pour justifier que les acides restent sous la forme carboxylates, et devant le jury avec phénolphtaléine.

Exploitation à faire plutôt sur transparent. Remonter à la masse et comparer à l'étiquette.

3.3. Formulation et excipients

D'où viennent les 100 mg manquants ? Des excipients, dont on présente rapidement le rôle.

Conclusion

Citer d'autres médicaments, p.ex. le paracétamol.

♣ Remarques

▷ J'ai présenté cette leçon le jour de l'oral. La synthèse a bien marché, j'ai eu des surprises lors du dosage. Les questions ont été sans surprise : correction d'erreurs que j'avais dites, mécanisme réactionnel, culture chimique (ODG de pK_a notamment). Le jury a ensuite ouvert le JFLM, et m'a fait détailler et justifier certains points du protocole.

Lors de l'entretien le jour des résultats, il m'a été reproché d'avoir dit des choses fausses qui étaient écrites dans le JFLM, et que je n'avais pas repérées donc pas corrigées. Attention donc ! Plus surprenant, ils m'ont aussi reproché de n'avoir utilisé que le JFLM pour les parties 2 et 3, et m'ont dit qu'il fallait diversifier la bibliographie. Cependant le plan global convient aux dires du membre du jury que j'ai rencontré. De même, je n'ai pas eu de commentaire sur le choix de l'aspirine qui « n'est pas le seul médicament étudié au lycée ».

▷ La leçon de chimie est désormais suivie de l'épreuve « agir en fonctionnaire éthique et reponsable ». Ma note ne me permet pas d'en dire quoi que ce soit, si ce n'est que l'avoir préparée sérieusement ne suffit pas pour réussir cette épreuve, et le bon sens non plus.

▷ Des remarques sur le dosage de l'aspirine

J'ai présenté ce dosage à la fois en oral blanc et le jour de l'oral, et j'ai eu des surprises à chaque fois. Il nécessite donc quelques précautions.

La réaction de saponification ne doit pas être démarrée trop tôt, sans quoi de la soude est consommée de façon parasite (peut être par dissolution de CO_2 ?) et les résultats deviennent aberrants. Je pense qu'il faut attendre le dernier quart d'heure avant l'arrivée du jury, mais pas plus tôt.

De plus les cachets d'aspirine ne sont pas très bien calibrés et les résultats du dosage peuvent fluctuer d'un comprimé à l'autre (donc entre la préparation et le passage). Aux dires d'étudiants de médecine, comme il est très délicat de mélanger des poudres les cachets sont en fait calibrés à 10 % près.

LC12 : Piles : mise en jeu de transformations chimiques spontanées. (L)

♣ Bibliographie

- [57] *Chimie Terminale S*, collection Durupthy
 [88] *Chimie Terminale S*, collection Sirius
 [96] *Physique Chimie Première S*, nouveau programme, collection Microméga
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [140] *Chimie Terminale S*, collection Tomasio

♣ Pré-requis

Équilibre chimique et sens d'évolution d'un système
 Oxydoréduction

♣ Idées à faire passer

Principe de fonctionnement d'une pile : échange d'électrons via un circuit extérieur
 Conversion d'énergie chimique en énergie électrique
 Technologie de piles courantes

♣ Plan

Introduction

Défi énergétique. Courant électrique = déplacement d'électrons. Or redox = échange d'électrons. On va essayer de récupérer ces électrons pour les faire passer dans un circuit. Ce qui permet ça : les piles. Historique + lien à la vie courante.

1. Construction d'une pile électrochimique [140]

1.1. Rappel : transfert direct d'électrons

[88] p. 208. ☞ **Manip** : redox directe entre Cu et Zn. Rappeler le critère d'évolution spontanée : $Q_i < K$, insister sur le fait que c'est bien le cas

1.2. Transfert indirect d'électrons et définition d'une pile

Objectif : on veut récupérer sous forme électrique une partie de l'énergie libérée lors de la réaction chimique. Ça nécessite que les deux couples ne soient plus en contact physique.

[97] p. 190. ☞ **Manip** : pile Daniell. Concl : on a un générateur électrochimique. Le faire débiter dans une ampoule pour bien voir (le jury y tient).

Définition d'une pile.

1.3. Constituants d'une pile

Demi-pile, pont salin, un couple par demi pile. Réactions aux électrodes, anode, cathode

1.4. Mouvement des porteurs et polarité

☞ **Manip** : obtenir expérimentalement la polarité de la pile Daniell. En déduire le mouvement des électrons : ils vont du + vers le - dans le circuit extérieur.

Rôle du pont salin : fermeture électrique, électroneutralité

1.5. Schéma conventionnel

Sur l'exemple de la pile Daniell.

2. Pile en fonctionnement [140]

2.1. Caractéristique

☞ **Manip** : mesure point par point (boîte de résistance) de U et I , on obtient par fit $U = E - rI$.

2.2. Énergie stockée

Refaire le lien pile usée et équilibre chimique atteint. Bilan de matière et de charge délivrée au circuit extérieur Q . Puis : Énergie stockée = $Q \times fém$.

2.3. Durée de vie

Se méfier que a priori ça dépend de I : on a un ODG

3. Piles usuelles

[57] p. 217 et [96] en exos. Présenter chaque pile sur transparent, avec un schéma légendé et l'écriture des réactions.

- 3.1. Pile saline**
- 3.2. Pile alcaline**
- 3.3. Pile au lithium**
- 3.4. Pile à combustible**

Conclusion

Pile non rechargeable, ouvrir sur les accumulateurs.

LC13 : Électrolyses et accumulateurs : mise en jeu de transformations chimiques forcées. (L)

♣ Bibliographie

- [57] *Chimie Terminale S*, collection Durupthy
 [88] *Chimie Terminale S*, collection Sirius
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [104] *Chimie Terminale S*, collection Mesplède

♣ Pré-requis

Oxydoréduction
 Piles
 Équilibre chimique et évolution spontanée d'un système

♣ Idées à faire passer

On peut forcer le sens d'une réaction chimique
 Ça nécessite d'apporter de l'énergie au système
 Une fois qu'on la lui a apporté, il peut la restituer

♣ Plan

Introduction

Partir des piles rechargeables. On a déjà expliqué ce qui se passe quand la pile débite. Maintenant elle est à plat, et on va expliquer ce qui se passe quand on la recharge.

1. Mise en évidence d'une transformation chimique forcée [57]

1.1. Rappel : évolution spontanée

$\text{Cu} + \text{Br}_2$ (eau de brome). Calcul de Q_r , de K , critère d'évolution spontanée.

1.2. Transformation forcée

☞ **Manip** : avec électrodes de graphite. Calcul de Q_r . Relevé de point de la caractéristique.
 Concl : lorsqu'un géné fournit de l'énergie électrique à un système, il peut le forcer à évoluer.

2. Électrolyse

2.1. Définition et description

[88] p. 239. Définition. On applique à l'exemple de CuBr_2
 Mouvement des porteurs dans le circuit extérieur : imposé par le générateur. En déduire les réactions aux électrodes. Anode et cathode. Mouvement des porteurs dans la solution.
 Exploitation de la caractéristique : on fait constater la tension de seuil.

2.2. Un exemple industriel : obtention du cuivre par électrolyse

[93] p. 225, ch. « cuivre ». ☞ **Manip** : électrolyse d'une solution de cuivre (II).
 Blabla sur l'hydrométallurgie : on modélise la dernière étape.
 Bilan de matière, pesée. Mesure de $I \times \Delta t$, on doit retrouver le bilan de matière.

2.3. Autres applications

[104] p. 216-217. Être bref et descriptif : réactions aux électrodes, qui est anode et qui est cathode.

3. Accumulateurs

Deux références à synthétiser : [57] p. 238 (activité documentaire) + [97] ch. piles et accumulateurs.

3.1. Définition

3.2. L'accumulateur au plomb

☞ **Manip** : montrer une charge et une décharge. Insister sur l'aspect pile et électrolyse. On peut mesurer ou bien les temps de charge/décharge, ou bien les courants. Faire plusieurs cycles en préparation pour que ça marche bien.

3.3. Accumulateurs commerciaux

Batterie de voiture, accumulateur Nickel-Cadmium

Conclusion

[104] Ouverture à la bio (respiration et photosynthèse)

♣ Remarques

- ▷ Bien présenter $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ comme une *réaction* qui a lieu à l'électrode, et pas comme une demi-équation d'un couple redox.
- ▷ Être très rigoureux sur les mouvements des porteurs de charge.

LC14 : Étude qualitative et quantitative des espèces acido-basiques dans les liquides alimentaires et ménagers. (L)

♣ Bibliographie

- [27] *Des expériences de la famille acide/base*, D. Cachau-Hereillat
[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
[105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède

♣ Pré-requis

Dosages
Acido-basicité et oxydoréduction
Saponification
Tests caractéristiques des ions

♣ Idées à faire passer

La chimie s'applique au quotidien (OK, c'est pourri, mais la leçon aussi !)

♣ Plan

Introduction

Liquides alimentaires acides, liquides ménagers majoritairement basiques car ils saponifient les esters.

1. Étude d'un liquide ménager : le Destop

1.1. Tests qualitatifs des ions présents

[105] ☞ **Manip** : précipitation de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ pour HO^- et test à la flamme pour Na^+ .

1.2. Dosage

[27] ☞ **Manip** : suivi conductimétrique. Traiter soigneusement des incertitudes.

2. Études de liquides alimentaires

2.1. Ions hydrogencarbonates dans une eau gazeuse

[97] ☞ **Manip** : test qualitatif à l'eau de chaux, puis dosage pH-métrique.

2.2. Acidité totale du Coca-cola

[à savoir] ☞ **Manip** : essayer de tester les ions phosphate par ajout de nitrate d'argent. Il doit se former un précipité jaune Ag_3PO_4 . ☞ **Attention** : test trouvé sur Internet et jamais testé, succès non garanti.

[97] ☞ **Manip** : décarbonation (en préparation), puis dosage pH-métrique.

2.3. Acide ascorbique dans le jus de citron

[105] p. 98. ☞ **Manip** : dosage indirect colorimétrique.

Conclusion

Apports biologiques, rôle de l'acidité.

LC15 : Contrôle de qualité des produits de la vie courante. (L)

♣ Bibliographie

- [28] *Des expériences de la famille redox*, D. Cachau-Hereillat
 [58] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Durupthy
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Tests caractéristiques des ions
 Acido-basicité, oxydoréduction
 Techniques de dosages
 Saponification

♣ Idées à faire passer

Contrôle de qualité = espèces présentes + leurs quantités. Ce n'est pas qu'un dosage!
 La chimie s'applique au quotidien

♣ Plan

Introduction

Nécessité des contrôles qualité, sanitaire et commerciale

1. Contrôle de qualité et chimie

1.1. Caractéristiques d'un produit

[à savoir] Caractéristiques physiques, biologiques, chimiques (composition = molécules présentes + quantités).
 Contrôle de qualité avant mise sur le marché, et pendant la commercialisation

1.2. Mesurer des quantités de matière : rappel sur les techniques de dosage

Par étalonnage, direct, indirect.

2. Contrôle de la quantité d'une espèce chimique

2.1. Concentration en chlorure dans le sérum physiologique

Utilisation du sérum physio, nécessité de connaître sa concentration.

[97] ☞ **Manip** : identification des ions chlorure et sodium, puis dosage de Mohr. Traitement d'incertitude.

2.2. Masse de principe actif dans un cachet d'aspirine

[93] ☞ **Manip** : dosage indirect¹.

3. Vieillessement d'un produit

3.1. Vin et casse ferrique

[97, 58] ☞ **Manip** : dosage du fer dans le vin. ☹ **Attention** : ajouter seulement quelques gouttes d'eau oxygénée, et pas 2 mL!

3.2. Vieillessement de l'eau de Javel

[97] ☞ **Manip** : dosage indirect. Insister sur la précision sur les volumes et sur le matériel utilisé pour les prélever. Dire pourquoi la première réaction pose problème (elle est lente).

Conclusion

Ouverture sur d'autres types de test (spectro IR ou RMN), d'autres applications (contrôle anti-dopage).

♣ Remarque

J'ai présenté cette leçon en oral blanc. Je pense que quatre dosages est le maximum envisageable au niveau du temps, après quoi on n'a plus le temps de les exploiter correctement.

1. Des commentaires sur ce dosage avec la LC11.

LC16 : Colorants et pigments : extraction, synthèse, identifications. (L)

♣ Bibliographie

[37] *Florilège de chimie pratique*, F. Daumarie

[53] *Physique Chimie 1ère S*, nouveau programme, collection Dulaurans-Durupthy

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

[105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède

[149] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Galiléo : prendre l'édition de 1997 qui contient un peu plus de choses. C'est surtout pour l'enrobage de la leçon.

♣ Pré-requis

Spectrophotométrie

Représentation des molécules

Chromatographie

Indicateurs colorés

♣ Idées à faire passer

Relation structure-propriétés

La chimie s'applique au quotidien

♣ Plan

Introduction

[149] Omniprésence des colorants et pigments.

1. L'origine de la couleur [53]

1.1. Couleur et absorption

Lien avec le spectre lumineux, couleurs complémentaires.

1.2. Les molécules à l'origine de la couleur

Liaisons conjuguées, groupes chromophores et auxochromes. Exemples.

1.3. Colorants et pigments

Définitions.

2. Étude de substances colorées

2.1. Extraction et identification des colorants dans le jus de tomate

[97] pour le protocole et [37] pour faire la colonne. ☞ **Manip** : extraction, CCM, chromato sur colonne. 🍷

Attention : fabriquer une colonne est quelque chose de très technique!

2.2. Identifications des colorants dans le sirop de menthe

[105] ☞ **Manip** : identifier les colorants par spectro et comparer aux produits commerciaux.

3. Utilisation des molécules colorées

3.1. Synthèse d'une teinture pour textiles

[97] ☞ **Manip** : synthèse de l'indigo.

3.2. Synthèse d'un indicateur coloré

[93] ☞ **Manip** : synthèse de la phénolphthaléine.

Conclusion

Enjeu industriel et utilisations.

♣ Remarque

- ▷ Le nouveau programme de 1ère S demande un peu plus de contenu que seulement des manips.
- ▷ La leçon a été présentée en oral blanc. La préparation est un peu speed, et il faut absolument avoir testé la colonne à chromatographie avant de se lancer en vrai. Cette manip est une horreur.

LC17 : Arômes et conservateurs : extraction, synthèse, dosage. (L)

♣ Bibliographie

- [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [95] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Microméga
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède
 [149] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Galiléo : prendre l'édition de 1997.

♣ Pré-requis

Techniques expérimentales d'extraction et de synthèse organique
 Dosage indirect
 Oxydoréduction
 Chromatographie

♣ Idées à faire passer

Conservateurs et arômes naturels ou de synthèse
 La chimie s'applique au quotidien

♣ Plan

Introduction

Lecture d'une étiquette

1. Additifs alimentaires

[149] Blabla à faire à partir des chap 12 et 21.

2. Conservateurs

2.1. Synthèse de l'acide benzoïque

[95] ☞ **Manip** : synthèse complète. Préparer un transparent récapitulant la synthèse. S'aider des questions pour justifier et expliquer toutes les étapes.

2.2. Dosage de la vitamine C dans le jus de citron

[105] ☞ **Manip** : dosage indirect.

[à savoir] ☞ **Manip** : pomme recouverte pour un quart de jus de citron, pour un quart d'acide benzoïque et pour un quart de rien du tout.

3. Arômes

3.1. Identification de l'arôme vanille

[93] ☞ **Manip** : identification par CCM. Distinction naturel vs. artificiel.

3.2. Extraction du limonène

[95] ☞ **Manip** : extraction à partir d'un zeste d'orange. Transparent avec le principe de la manip, faire sentir. Ne pas faire la CCM.

3.3. Synthèse de l'ester de poire

[93] ☞ **Manip** : synthèse rapide. Faire l'estérification, identifier la phase aqueuse.

Conclusion

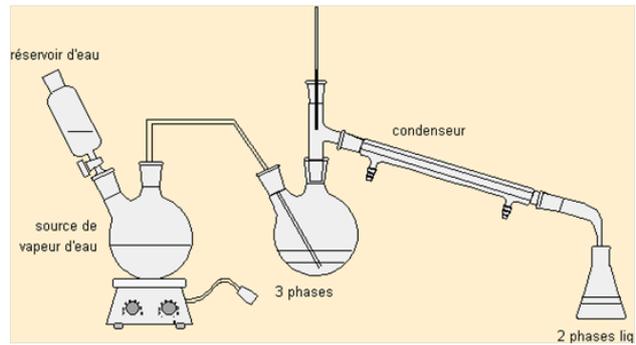
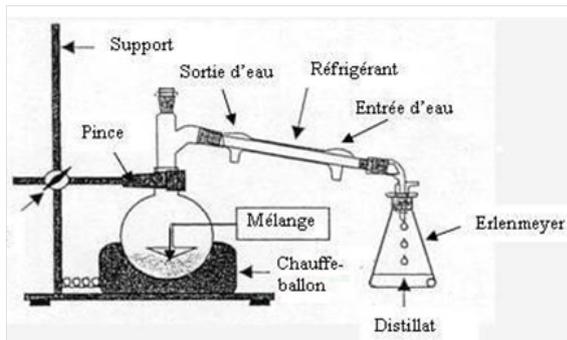
Ouverture sur le (+)-limonène et le (-)-limonène, lien structure-propriétés.

♣ Bonus : hydrodistillation ou entraînement à la vapeur ?

Le jury est chatouilleux sur la distinction entre les montages d'hydrodistillation (à gauche de la figure) et d'entraînement à la vapeur d'eau (à droite de la figure).

Dans un montage d'hydrodistillation, l'eau et les écorces sont mélangées dans le ballon. Le distillat contient alors le produit (ici le limonène) et de l'eau. Tout ça s'explique théoriquement avec les diagrammes binaires. Dans un montage d'entraînement à la vapeur d'eau, de l'eau distillée seule est mise dans le ballon de gauche. Elle s'évapore ensuite pour aller dans le ballon central, où les écorces sont mélangées avec un solvant organique. On a donc un mélange à trois phases. J'imagine que la théorie est un peu plus complexe, mais il se trouve que si le solvant organique est convenablement choisi, le distillat ne contient que le produit (le limonène) et de l'eau.

Le résultat est donc le même dans les deux cas, mais les montages sont différents. Si je comprends correctement la subtilité, dans un montage d'entraînement à la vapeur, les composés organiques sont moins chauffés, et donc moins susceptibles d'être dégradés thermiquement.



LC18 : Dosages directs et indirects. (L)

♣ Bibliographie

- [27] *Des expériences de la famille acide/base*, D. Cachau-Hereillat
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [95] *Physique Chimie Terminale S spécialité*, collection Microméga
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Équilibre chimique et bilan de matière
 Réaction acide-base, redox
 Conductimétrie, pH-métrie, indicateurs colorés
 Estérification et saponification

♣ Idées à faire passer

Une réaction de dosage doit obéir à des critères assez contraignants
 Quand on ne peut pas respecter ces contraintes, on contourne le problème en faisant un dosage indirect

♣ Plan

Introduction

Intérêt des dosages. Dosages par méthode physique, par étalonnage. Dosage par titrage : à définir, puis préciser qu'on fera l'amalgame.

1. Réactions de titrage [95]

1.1. Principe d'un titrage

Objectif, définitions espèce titrée/titrante, équivalence. Limitations par la nature de l'espèce (Na^+ , K^+ , Li^+ ne sont pas titrables) et par un seuil de concentration d'environ $10^{-4} - 10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}$.

1.2. Propriétés d'une réaction de titrage

Totale, rapide, unique et équivalence facilement détectable. Opposer fin de titrage et équivalence.

1.3. Dosages directs et indirects

Dosage direct. Nécessité du dosage indirect. Les deux types de dosage indirect.

2. Dosages directs

2.1. Dosage de la soude contenue dans le Destop

[27] ☞ Manip : suivi conductimétrique.

Traitement d'incertitudes : l'incertitude sur le résultat est au moins égal à l'incertitude sur la concentration de la solution titrante et à celle sur le volume prélevé.

2.2. Dosage des ions chlorure contenus dans le sérum physiologique

[97] ☞ Manip : dosage de Mohr par précipitation, suivi colorimétrique. A faire en bonus si on a le temps.

3. Dosages indirects

3.1. Dosage de l'eau de Javel par iodométrie

[97] ☞ Manip : dosage indirect, suivi colorimétrique. Insister sur la précision sur les volumes et sur le matériel utilisé pour les prélever. Dire pourquoi la première réaction pose problème (elle est lente).

3.2. Masse de principe actif dans un cachet d'aspirine

[93] ☞ Manip : dosage indirect¹, suivi pH-métrie en préparation puis colorimétrique en direct.

Conclusion

Contrôles de qualité, où le dosage doit être couplé à l'identification des espèces.

♣ Remarque

Je trouve cette leçon bizarrement placée. Je la vois personnellement plutôt comme une leçon de synthèse sur les dosages, parce qu'on en a déjà vu plein (ou plein de fois les mêmes) dans les LC de lycée précédentes. Je ne sais pas si c'est la bonne façon de voir les choses.

1. Des commentaires sur ce dosage avec la LC11.

LC19 : Étude expérimentale du caractère évolutif des propriétés physico-chimiques dans la classification périodique. (CP)

♣ Bibliographie

- [28] *Des expériences de la famille redox*, D. Cachau-Hereillat
 [54] H-Prépa Chimie PCSI 1ère période, A. Durupthy
 [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Modèle quantique de l'atome
 Interactions de van der Waals
 Oxydoréduction et acido-basicité

♣ Idées à faire passer

Les propriétés des éléments sont liées à leur configuration électronique externe
 On peut établir des corrélations entre comportement macro et structure micro

♣ Plan

Introduction

Historique, Mendeleïev etc.

1. Rappels sur la structure de la classification

1.1. Règles de construction

Notion d'élément, Z , structure électronique, méthode de construction.

1.2. Périodicité

[93] p. 273. ☞ **Manip** : précipitation des halogénures d'argent. Mise en évidence de la notion de famille.
 ☞ **Manip** : redissolution. Déplacement d'équilibre, on montre l'évolution selon une colonne.

2. Propriétés physiques

2.1. État physique des dihalogènes

[93] p. 265. ☞ **Manip** : montrer les dihalogènes dans un flacon ... si on y a droit ! Sinon expliquer. Interprétation en termes de polarisabilité, liée à la taille de l'atome, donc au n de la couche externe.

2.2. Énergie de première ionisation et affinité électronique

Définition et évolution. Lien à la règle de l'octet.

2.3. Électronégativité

Définition qualitative. Échelles de Mulliken, Pauling. Différences de définition mais cohérence de résultats et d'interprétation. Ouf!

Interprétation avec la structure de la couche externe, relier à la discussion sur EI et AE. Évolution dans la classification.

C'est une grandeur qui permet d'interpréter plein de propriétés chimiques, et dont on va largement se servir dans la suite.

3. Propriétés chimiques

3.1. Caractère oxydant ou réducteur

Évolution en ligne : [97] p. 69. ☞ **Manip** : sodium dans l'eau. Le sodium est un réducteur (très fort). ⚠ **Attention** : la manip peut être dangereuse.

[93] p. 268. ⚠ **Attention** : référence pourrie, c'est caché au milieu d'autre chose. ☞ **Manip** : eau de chlore + solution de sel de Mohr (contient Fe^{2+}). Le dichlore est un oxydant.

[28] p. 146. ☞ **Manip** : réaction des dihalogènes sur les halogénures. Évolution en colonne.
 Conclusion : compatible avec l'électronégativité

3.2. Caractère acido-basique des oxydes

Définition d'un oxyde : un élément + de l'oxygène. Oxyde ionique ou covalent.

[28, 79] ☞ **Manip** : combustion du magnésium (oxyde basique), précipitation et redissolution de AlOH_3 (oxyde amphotère) et combustion du soufre (oxyde acide). ☹ **Attention** : les manips sont vraiment dangereuses.

Conclusion : compatible avec l'électronégativité

Conclusion

Ouvrir à la règle de l'octet. Ouvrir sur le fait qu'ici on a étudié des éléments, mais qu'en pratique on a plutôt des molécules, du solvant etc, et c'est beaucoup plus compliqué.

♣ Remarques

- ▷ Les expériences n'illustrent pas seulement des propriétés atomiques (pas d'espèce gazeuses monoatomiques!). Les propriétés dépendent aussi des associations entre atomes (liaisons), du solvant, des interactions entre molécules etc. mais elles permettent de mettre en évidence les idées importantes. On peut établir des corrélations entre les échelles micro et macro, mais ce ne sont pas des identifications!
- ▷ Ne pas s'apensantir sur les parties théoriques : il faut faire arriver les expériences le plus tôt possible.
- ▷ Les règles de Slater sont hors-programme, mais viendront à tous les coups en questions.
- ▷ Faire attention à sécuriser les manips comme il faut, tant du point de vue des explosions que des dégagements gazeux toxiques.

LC20 : Illustrations expérimentales des relations entre structure et propriétés des molécules. (CP)

♣ Bibliographie

- [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias : contient tous les aspects théoriques de la leçon.
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Atomistique
 Représentations de Lewis et de Cram
 Chimie des solutions aqueuses : acide-base et complexation
 Liaisons faibles
 Méthode VSEPR

♣ Idées à faire passer

Les propriétés macro des espèces chimiques dépendent de la structure micro des molécules.
 Les différences de géométrie permettent des interactions différentes, résultant en propriétés macro différentes

♣ Plan

Introduction

Passage de l'étude d'une seule entité en atomistique aux propriétés de l'espèce chimique, constituée de \mathcal{N}_A molécules.

1. Structure électronique

1.1. Structure de Lewis

Rappel sur la structure de Lewis. Notion d'acide ou base de Lewis.

[97] ☞ **Manip** : complexations successives de Ni^{2+} par NH_3 .

1.2. Liaisons doubles et réactivité

[à savoir] ☞ **Manip** : test à l'eau de brome sur le cyclohexane et l'hexène.

1.3. Remplissage des niveaux d'énergie et magnétisme

[à savoir] ☞ **Manip** : paramagnétisme de O_2 . Se contenter de donner le diagramme d'OM de O_2 car sa construction est hors programme.

2. Géométrie moléculaire

2.1. Rappel : théorie VSEPR

Bref rappel sur transparent.

2.2. Solubilité

[97] § dosage de SO_2 dans le vin pour les valeurs. Comparaison des solubilités de CO_2 et SO_2 dans l'eau.

2.3. Chiralité et activité optique

Définir la chiralité : une molécule est chirale si elle est différente de son image dans un miroir. Elles forment alors un couple d'énantiomères. L'activité optique est la seule propriété physique permettant de distinguer deux énantiomères. [93] p. 18. ☞ **Manip** : loi de Biot. ☞ **Manip** : chiralité et odeur (+)-limonène et (-)-limonène.

3. Liaisons faibles

3.1. Rappel des définitions

Liaisons de Van der Waals et liaisons hydrogène.

3.2. Températures de changement d'état

[93] p. 265. ☞ **Manip** : états physique des dihalogènes. Interprétation avec la polarisabilité.

[93] p. 6. ☞ **Manip** : températures de fusion des acides fumarique et maléique au banc Köfler.

3.3. Constantes d'acidité

[93] p. 3. ☞ **Manip** : dosage des acides fumarique et maléique.

Conclusion

Spectroscopies IR et RMN.

LC21 : Cristaux ioniques : du modèle à la réalité. (CP)

♣ Bibliographie

- [51] H-Prépa *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**, A. Durupthy : vieux livre vert
 [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [67] *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**, R. Fournié : ancienne édition de chez Dunod
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Définitions cristallographiques
 Cristaux métalliques

♣ Idées à faire passer

Modèle ionique
 Conditions de cristallisation selon les espèces en présence
 Écarts au modèle

♣ Plan

Introduction

On a vu les cristaux métalliques, on va voir un autre type de solides.

1. Le solide ionique et ses propriétés [78, 52]

1.1. Existence d'ions à l'état solide

Différence d'électronégativité, cartes de densité électroniques.

1.2. Liaison ionique et cristal ionique

Définition du cristal ionique. Interactions entre les ions. Rayon ionique. Ionicité de la liaison (définition). Règles de construction du cristal : contact entre anions et cations, au pire contact entre anions.

1.3. Propriétés des cristaux ioniques

Énergie de cohésion, température de fusion, conductivités, propriétés mécaniques.

2. Différents exemples de structures [78]

2.1. Type CsCl

Détailler. Condition de stabilité.

2.2. Type NaCl

[à savoir] ☞ Manip : pycnométrie.

2.3. Type ZnS blende

2.4. Type fluorine

3. Limites du modèle ionique

3.1. Ionicité de la liaison

[52] Exemple de ZnS blende : faible ionicité

[97] ☞ Manip : solubilité des halogénures d'argent. [à savoir] Interpréter en calculant l'ionicité des liaisons à partir des électronégativités des éléments.

3.2. Défauts

[67] Dislocations, défauts ponctuels. Conséquences : conduction électrique, coloration.

[97] ☞ Manip : billes dans le cadre.

3.3. Écarts aux prévisions

☞ Attention : il faut connaître l'exemple, trouver la résolution en exercice corrigé de [78] et comparer aux rayons ioniques données dans un tableau de [51]. Exemple de α -AgI : devrait cristalliser en NaCl, le fait en ZnS.

♣ Remarque

La définition des rayons ioniques est subtile. Elle n'est ni théorique, ni expérimentale, mais tabulée par moyenne sur des expériences à partir d'un modèle.

LC22 : Métaux et alliages : structures. (CP)

♣ Bibliographie

[51] H-Prépa *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**, A. Durupthy : vieux livre vert, à utiliser pour ponctuer la leçon d'ordres de grandeur

[52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy

[78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias

[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Définitions cristallographiques

♣ Idées à faire passer

Structures cristallines

Lien micro et macro

♣ Plan

Introduction

De tout temps les hommes ont forgé des métaux, et surtout se sont interrogés sur leur structure microscopique.

1. Cohésion métallique [78]

1.1. Propriétés des métaux

Lister les propriétés mécaniques, optiques, électriques, thermiques (à ajouter). Situer dans la classification.

1.2. Modèle de liaison métallique

[à savoir] Gaz d'électrons libres. Interpréter les propriétés mécaniques par déplacement de plans réticulaires.

2. Structure des métaux [78]

2.1. Modèle du cristal parfait

Définition. Modèle des sphères dures et rayon métallique.

Rappeler rapidement les définitions de cristallographie : maille, réseau, motif, coordinence.

2.2. Structures compactes

[97] 🧪 **Manip** : montrer l'empilement à la flexcam : ABA ou ABC. Traiter complètement hc et donner les résultats pour cfc.

2.3. Structure pseudo-compacte

Traiter cc.

2.4. Variétés allotropiques

[97] 🧪 **Manip** : recalescence du fer.

3. Alliages

3.1. Solutions solides de substitution

[52] Définition et exemple en comparant les rayons métalliques.

3.2. Solutions solides d'insertion

[78] Sites cristallographiques (nombre de sites par maille différent pour h.c. et c.f.c., mais même nombre de sites par atomes). Calcul de taille de site. Alliages d'insertion.

3.3. Propriétés des alliages

[à savoir] Amélioration des propriétés mécaniques, résistance à la corrosion, meilleure coulabilité.

Conclusion

Ouvrir sur les limites du modèle de cristal parfait.

LC23 : Enthalpie de réaction : mesures et applications. (CP)

♣ Bibliographie

- [4] *Chimie physique*, P. Atkins et J. de Paula : attention, plusieurs livres du même auteur au même nom
 [37] *Florilège de chimie pratique*, F. Daumarie
 [55] H-Prépa Chimie PCSI 2ème période, A. Durupthy : tous les aspects théoriques de la leçon sont dedans
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Chimie des solutions aqueuses
 Thermochimie du premier principe

♣ Idées à faire passer

Les réactions chimiques mettent en jeu des transferts d'énergie
 On peut récupérer et exploiter cette énergie

♣ Plan

Introduction

[97] ☞ **Manip** : mise en évidence d'effets thermiques par dissolution de sels.

1. Principe de mesure

[97] ☞ **Manip** : mesure de l'enthalpie de réaction $\text{Cu}^{2+} + \text{Zn}$, qui sert d'exemple pour toute cette partie.

1.1. Rappels théoriques

Rappeler rapidement la définition de l'enthalpie de réaction $\Delta_r H$, presque égal à $\Delta_r H^\circ$ pour des phases condensées (nécessaire pour comparer aux grandeurs tabulées). Lien avec ΔH au cours d'une réaction.

Réactions endo et exo thermiques.

1.2. Calorimétrie

Présenter le vase Deware. Chaleur en eau (qu'on aura mesurée en préparation).

Conditions expérimentales telles que $\Delta H = 0$, donc ce qu'on mesure est égal à la variation chimique d'enthalpie.

2. Mesures d'enthalpies de réaction

2.1. Mesure directe d'une enthalpie de réaction

Exploiter la réaction redox. ☹ **Attention** : le JFLM est sans doute faux, suivre le H-Prépa est plus sûr.

2.2. Mesure indirecte d'une enthalpie d'hydratation

[37] p. 97. ☞ **Manip** : hydratation du carbonate de calcium. Bien prendre le temps d'exploiter la manip, l'interprétation est un peu délicate.

3. Application à la production chimique d'énergie

3.1. Combustion

[97] ☞ **Manip** : mesure de la perte de masse d'une bougie.

Applications : gaz de ville, voitures dont on peut calculer la conso en faisant l'exo du H-Prépa.

3.2. Température de flamme

Définition, exemple en exo sur les fusées.

3.3. Biochimie

[4] Deux exemples : digestion des aliments et hydrolyse de l'ATP

3.4. Lien avec les énergies de liaison

A adapter en fonction du temps.

Conclusion

La production d'énergie par réaction chimique a des tas d'applications et c'est grâce à ça qu'on vit. Youpi!

♣ Attention !

- ▷ Il faut être attentif aux différences entre $\Delta_r H$, $\Delta_r H^\circ$ et ΔH ... et évidemment ne pas se tromper.
- ▷ « L'avancement et le signe des bilans enthalpiques ne doivent pas sembler arbitraires »

LC24 : Illustrations expérimentales et applications des réactions de complexation. (CP)

♣ Bibliographie

- [37] *Florilège de chimie pratique*, F. Daumarie
 [40] BUP 663, *Danger : monoxyde de carbone*, P. Delvalle, avril 1984
 [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède
 [144] BUP 857, *L'hydrométallurgie*, J.L. Vignes, octobre 2003

♣ Pré-requis

Dosages
 Équilibres en solution aqueuse
 Complexes : théorie

♣ Idées à faire passer

Caractéristiques des réactions de complexations
 Existence d'applications industrielles

♣ Plan

Introduction

On a déjà vu rédox et acide-base. Complexation : met en jeu un autre type de particules échangées.

1. Caractérisation des réactions de complexation

1.1. Détermination de la stœchiométrie d'un complexe

[97, 37] ☞ **Manip** : stœchiométrie et constante de formation de $\text{Fe}(\text{SCN})$.
 Diagramme de prédominance, constantes d'équilibre.

1.2. Complexations successives

[97] ☞ **Manip** : complexations successives de Ni^{2+} par l'ammoniac. Diagramme de prédominance.

1.3. Complexations compétitives

[105] Ajouter de l'EDTA à $\text{Fe}(\text{SCN})$. Diagrammes de prédominance.

1.4. Influence de la complexation sur l'oxydoréduction

[79] ch. redox. Donner plus ou moins de détail. Relier aux équilibres compétitifs.

2. Un exemple de dosage par complexation : la dureté de l'eau [97]

2.1. Principe

Dosage simultané, indicateur. Très bien expliquer le pourquoi de chaque chose.

2.2. Titrage commun de Ca^{2+} et Mg^{2+}

☞ **Attention** : l'IC doit être du NET *dilué* sinon on ne voit rien.

2.3. Titrage commun de Ca^{2+} seul

☞ **Attention** : l'IC doit être du Patton-Reeder, le NET perd ses propriétés au pH auquel a lieu ce dosage.

3. Applications quotidiennes de la complexation

3.1. Traitement sélectif des métaux

[à savoir] ☞ **Manip** : séparation du fer et de l'aluminium par précipitation puis complexation. ☞ **Attention** : la filtration ne marche pas, c'est pourquoi en pratique on utilise des précipités plus complexes (cf. jarosite)

[144] Rôle des ions cyanure dans l'hydrométallurgie de l'or.

3.2. Application à la biologie

[40] Transport du dioxygène par l'hémoglobine. Empoisonnement avec le CO.

Conclusion

Déchets nucléaires, séparés par complexation. Cité par un correcteur de l'ENSL, mais nous n'avons trouvé aucune biblio . . .

LC25 : Illustrations expérimentales et applications des réactions de précipitation. (CP)

♣ Bibliographie

- [11] BUP 619, *Analyse partielle de l'eau de Contrexéville*, N. Berlemont, décembre 1979
 [28] *Des expériences de la famille redox*, D. Cachau-Hereillat
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède

♣ Pré-requis

Précipitation : étude théorique
 Conductimétrie
 Oxydoréduction et potentiométrie
 Complexation

♣ Idées à faire passer

Produit de solubilité et condition d'existence du précipité
 Utilisation industrielle répandue

♣ Plan

Introduction

Partir de ce que l'on a vu sur la mise en solution d'un solide.

1. Réaction de précipitation

1.1. Définitions

[79] Définition d'un précipité. ☞ **Manip** : précipitation de AgCl.
 Produit de solubilité, solubilité. Diagrammes d'existence.

1.2. Facteurs influençant la solubilité

[79] Température, effet d'ions communs et compétition avec complexation et acidification.
 [97] ☞ **Manip** : pluie d'or (effet de température).
 [à savoir] ☞ **Manip** : ajout d'acide chlorhydrique à une solution saturée en NaCl (effet d'ion commun).
 [93] ☞ **Manip** : redissolution des précipités d'halogénures par l'ammoniac (compétition avec la complexation).

2. Dosages par précipitation

2.1. Dosages des ions chlorure dans le sérum physiologique

[97] ☞ **Manip** : test caractéristique de l'ion chlorure et dosage de Mohr. Bien expliquer les précipitations compétitives avec diagramme d'existence. Ajouter un suivi potentiométrique pour remonter au K_s de AgCl.

2.2. Dosage des sulfates dans l'eau de Contrex

[11] ☞ **Manip** : test caractéristique de l'ion sulfate et dosage conductimétrique.

3. Identification et traitement des ions

3.1. Tests caractéristiques d'ions

[97] Réexploiter le préambule des deux dosages précédents où on a identifié les ions.
 [28] ☞ **Manip** : tests par formation d'hydroxydes.

3.2. Séparation des ions

[105] ☞ **Manip** : séparation de Fe^{2+} et Mn^{2+} .
 [78] Lixiviation dans l'hydrométallurgie du zinc.

Conclusion

L'équilibre hétérogène permet de séparer efficacement des constituants.

LC26 : Principe et illustration des dosages potentiométriques (pH-métrie exclue). (CP)

♣ Bibliographie

[79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Oxydoréduction

Précipitation

Principe d'un dosage

♣ Idées à faire passer

La potentiométrie fournit un bon indicateur de fin de titrage

Mais c'est encore plus cool : on peut aussi mesurer des grandeurs thermodynamiques !

♣ Plan

Introduction

Difficulté de réaliser certains dosages faute d'un bon indicateur de fin de titrage.

1. Principe des dosages potentiométriques

1.1. Choix d'une réaction de dosage

[à savoir] Critères pour une bonne réaction (unique, rapide, quantitative, indicateur de fin de titrage). Outil possible pour repérer la fin de titrage : potentiel redox.

1.2. Le potentiel d'oxydoréduction

[79] Rappeler la formule de Nernst. Unicité du potentiel dans une solution.

1.3. Mesure du potentiel d'oxydoréduction

[à savoir] On ne peut mesurer que des ddp : on fait donc une pile, dont on mesure la fém.

[79] Nécessité de l'électrode de référence et son rôle dans la pile. Choix de la deuxième électrode en fonction du titrage. Les trois espèces d'électrodes.

2. Dosage cérimétrique des ions Fer (II) dans le sel de Mohr [93, 79]

2.1. Principe du dosage

Problématique : vieillissement du sel de Mohr. Discuter le choix des électrodes et le rôle du tampon sulfurique.

2.2. Réalisation expérimentale et mesure de concentration

☞ **Manip** : faire le dosage ! Déduire la concentration du sel de Mohr par tracé de la courbe $E = f(V)$. Discussion rigoureuse d'incertitudes.

2.3. Mesure du potentiel standard

Finir l'exploitation de la partie extrême de la courbe. Penser à discuter aussi les incertitudes sur le potentiel standard. ☞ **Attention** : les concentrations sont différentes entre les deux livres. On doit trouver $E^\circ < E^\circ(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})$ en raison des complexations par les ions sulfate, ce qu'il faut commenter.

Vérifier a posteriori que la réaction de titrage est bien quantitative.

3. Dosage argentimétrique des ions chlorure dans le sérum physiologique [97]

3.1. Principe du dosage

Problématique : contrôle de qualité du sérum physiologique. Adapter le protocole « théorique » au dosage du vrai sérum physio.

3.2. Réalisation expérimentale et mesure de concentration

☞ **Manip** : faire le dosage ! Déduire la concentration du sérum physio par tracé de la courbe $E = f(V)$. Ne pas oublier de revenir sur l'aspect contrôle de qualité, ni de discuter d'incertitudes (rapidement).

3.3. Mesure du potentiel standard et du produit de solubilité

Finir l'exploitation des deux parties extrêmes. Discuter rapidement des incertitudes.

Vérifier a posteriori que la réaction de titrage est bien quantitative.

Conclusion

Ouvrir à la pH-métrie, cas particulier de potentiométrie pour le couple H^+/H_2 .

♣ Remarque

Cette leçon a été présentée à l'oral. Aux dires du jury, il est tout à fait suffisant de présenter deux dosages et non pas trois, car cela permet une exploitation plus poussée de chacun d'entre eux.

LC27 : Cinétique homogène : étude expérimentale. (CP)

♣ Bibliographie

- [37] *Florilège de chimie pratique*, F. Daumarie
 [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [105] *100 manipulations de chimie générale et analytique*, J. Mesplède

♣ Pré-requis

Cinétique formelle
 Spectrophotométrie
 Conductimétrie

♣ Idées à faire passer

Choix de la méthode de suivi
 Choix des conditions expérimentales
 Les lois des vitesses sont expérimentales

♣ Plan

Introduction

On a déjà vu cinétique qualitative et formelle. Suivi expérimental quantitatif ?

1. Suivi expérimental d'une réaction chimique

[105] ☞ **Manip** : réaction $I^- + S_2O_8^{2-}$ suivi par spectrophotométrie.

1.1. Rappels : vitesse et ordre de réaction

Redéfinir rapidement la vitesse volumique, la loi de vitesse et les ordres partiels. Loi d'Arrhénius.

1.2. Méthodes de suivi

Méthodes chimiques et physiques. Le but est d'avoir une grandeur mesurable simplement et qui soit reliée simplement à l'avancement de la réaction. Dans notre cas : suivi spectro adapté car une seule espèce absorbe, écrire explicitement la vitesse de réaction en fonction de A .

2. Détermination expérimentale d'une loi de vitesse

Exploiter la manip précédente de différentes façons.

2.1. Choix de conditions expérimentales : dégénérescence de l'ordre

Conditions expérimentales : expliquer la dégénérescence de l'ordre, ici par rapport aux ions iodure.

Bien mettre en avant qu'il s'agit d'un choix expérimental visant à rendre possible l'exploitation par la suite.

2.2. Méthodes d'exploitation

Méthode intégrale : à faire (en montrant un cas où ça marche et un cas où l'hypothèse est fautive).

Méthode différentielle : à faire.

Méthode des vitesses initiales : à mentionner.

Méthode des temps de demi-réaction : à mentionner.

2.3. Détermination de l'ordre global

[à savoir] ☞ **Manip** : même réaction mais en proportions stoechiométriques. Obtenir alors l'ordre global. Là encore mettre en avant qu'on choisit des conditions expérimentales adaptées à ce que l'on veut mesurer.

Conclusion : ordres partiels et constante de vitesse.

3. Influence de la température

3.1. Présentation de la réaction

[37] ☞ **Manip** : hydrolyse de tBuCl suivi par conductimétrie.

Écrire explicitement la vitesse de réaction en fonction de σ . On remonte à l'ordre partiel et à une constante de vitesse apparente.

3.2. Énergie d'activation

☞ **Manip** : remonter à E_a via la loi d'Arrhénius (2 ou 3 points).

Conclusion

Vers les mécanismes réactionnels.

LC28 : Mécanismes réactionnels en cinétique homogène : illustrations. (CP)

♣ Bibliographie

- [15] *Chimie organique expérimentale*, M. Blanchard
 [37] *Florilège de chimie pratique*, F. Daumarie
 [54] H-Prépa Chimie PCSI 1ère période, A. Durupthy : pour toutes les définitions
 [79] Tec&Doc Chimie PCSI, P. Grécias : complète le H-Prépa
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [103] Précis Bréal Chimie PCSI, J. Mesplède : pour un exemple seulement

♣ Pré-requis

Cinétique lycée
 Cinétique formelle
 Conductimétrie

♣ Idées à faire passer

Une réaction est une succession d'actes élémentaires
 Méthode pour trouver un mécanisme réactionnel

♣ Plan

Introduction

[97] ♻ **Manip** : sel de Seignette. Insuffisance de l'équation bilan pour décrire le processus micro, et le rôle du catalyseur.

1. Actes élémentaires

1.1. Définition

Définition d'un acte élémentaire. Conditions de faible molécularité et réorganisation.

1.2. Modèle de collisions

Loi de van't Hoff. Choc efficace (géométrie + énergie).

1.3. Introduction à la théorie du complexe activé

Surface de réaction. Chemin réactionnel, coordonnée de réaction, profil réactionnel. État de transition, énergie d'activation, loi d'Arrhénius.

2. Etude d'un mécanisme réactionnel : l'hydrolyse de tBuCl

[37, 15] ♻ **Manip** : hydrolyse de tBuCl suivi par conductimétrie.

2.1. Position du problème

Étapes d'une étude cinétique. Mécanisme postulé, intermédiaires réactionnels.

2.2. Obtention de la loi de vitesse

Objectif, principe, nécessité des approximations. AEQS, à illustrer avec le logiciel CINEWIN.

2.3. Confrontation aux résultats expérimentaux

Exploitation, validité du mécanisme, constante de vitesse. Si temps : influence du solvant.

3. Différents types de mécanisme

3.1. Réaction par stades

[103] Définition. Exemple : décomposition de N_2O_5 . Loi de vitesse sur transparent.

3.2. Réaction en chaîne

Définition. Exemple : synthèse thermique de HBr. Loi de vitesse sur transparent.

3.3. Retour sur la catalyse

Définition propre d'un catalyseur.

Conclusion

Rationalisation de la chimie orga.

♣ Remarque

Nous avons préparé et présenté cette leçon à la classe pendant l'année. Elle a été ensuite réduite, mais reste une leçon vraiment très longue.

LC29 : Illustrations expérimentales et applications des lois de déplacement des équilibres. (CP)

♣ Bibliographie

- [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [89] BUP 879, *Étude de l'équilibre entre $\text{NO}_2(\text{g})$ et $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$* , J. Jézéquel, décembre 2005
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Lois de déplacement des équilibres
 Estérification

♣ Idées à faire passer

Intérêt de la loi de modération pour prévoir ce qui se passe
 Nécessité industrielle de maîtriser les déplacements d'équilibre

♣ Plan

Introduction

Rappeler la notion de facteur d'équilibre. Rappeler qu'à l'aide de l'affinité on a établi des lois de modération, qui peuvent se traduire généralement par le principe de modération.

[à savoir] ☞ **Manip** : solution saturée de NaCl dans des tubes à essais. Ajout de HCl concentré : précipité. Chauffage au bec bunsen : dissolution. Ajout d'eau : dissolution.

1. Influence des paramètres extérieurs : température et pression

1.1. Influence de la température

[97] ☞ **Manip** : pluie d'or. Bien revenir à froid pour montrer qu'on déplace vraiment un équilibre, et qu'on ne fait pas qu'accélérer une cinétique. Interprétation : disparition du précipité quand on chauffe et sa réapparition en refroidissant. Le changement d'aspect fait appel aux contrôles cinétique et thermo. Énoncer la loi de modération relative.

[89] ☞ **Manip** : $\text{NO}_2(\text{g})$ et $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ dans l'ampoule en verre. Attention à l'interprétation, on est à V constant.

1.2. Influence de la pression

[89] ☞ **Manip** : $\text{NO}_2(\text{g})$ et $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$ en seringue.

[à savoir] ☞ **Manip** : ouvrir une bouteille d'eau gazeuse et commenter ce qui se passe. Double interprétation : on diminue la pression, mais on enlève aussi un constituant.

2. Influence de la composition du système

2.1. Ajout d'un constituant actif

[à savoir] absolument par cœur, manip super technique. ☞ **Manip** : ajout de phénolphtaléine à de la soude. Interpréter avec la constante d'équilibre et les quotients de réaction. Réinterpréter la manip d'intro sur les effets d'ion commun.

2.2. Equilibres compétitifs

[93] ☞ **Manip** : dissolution de AgCl par NH_3 .

[97] à adapter. ☞ **Manip** : précipitations compétitives, en utilisant comme exemple la réaction et l'IC du dosage du sérum physiologique par le nitrate d'argent (dosage de Mohr).

3. Applications industrielles

3.1. Déplacement de la réaction d'estérification

Estérification = athermique, donc on ne peut pas jouer sur T . Pas de gaz, donc pas sur P non plus.

[93] ☞ **Manip** : estérification avec appareil de Dean-Stark, à interpréter en termes d'équilibres compétitifs.

3.2. Optimisation de la réaction de synthèse de l'ammoniac

[78] Quasi-textuellement.

[52] Désintérêt de l'ajout de gaz inertes.

Conclusion

Ici des cas simples, en général c'est plus compliqué car beaucoup d'effets en concurrence. Nécessité aussi parfois de compromis avec la cinétique.

♣ Remarques

- ▷ Appareil de Dean Stark : on enlève l'eau du milieu réactionnel par hydrodistillation (production d'une vapeur d'eau et toluène). Le toluène est ensuite recyclé après condensation.
- ▷ En général en changeant les conditions dans le milieu on change de réaction prépondérante. Déplacer notablement un équilibre, c'est souvent en pratique remplacer la RP initiale par une autre RP.
- ▷ Dit autrement, à part en jouant sur T on ne peut pas modifier K . Donc forcer un système à évoluer dans le sens direct, c'est s'arranger pour maintenir $Q_r < K$.
- ▷ Au delà de la chimie, je pense que cette leçon mérite d'être mieux réfléchiée pour arriver à un plan plus cohérent que ma superposition d'expériences.

LC30 : Mélanges binaires : équilibres liquide-vapeur ; applications (liquides non miscibles exclus). (CP)

♣ Bibliographie

- [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [56] *Chimie 1ère S*, collection Durupthy
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [147] *Chimie 1ère S*, collection Galiléo

♣ Pré-requis

Thermochimie : potentiel chimique, variance
 Réfractométrie

♣ Idées à faire passer

Un binaire ne se comporte pas comme deux corps purs
 On peut se servir de ces propriétés pour séparer deux corps purs mélangés
 Notion de variance

♣ Plan

Introduction

Un binaire ne se comporte pas comme deux corps purs côte à côte.

[à savoir] ☞ **Manip** : mélange pentane-heptane en distillation simple. Ça bout, et pourtant on n'est à T_{eb} ni de l'un ni de l'autre, et le distillat n'est pas pur.

1. Construction et lecture

1.1. Analyse thermique et construction du diagramme

[78] On envisage un diagramme isobare. Présenter l'analyse thermique et la construction expérimentale du diagramme. Définir courbes de rosée et d'ébullition comme les fins de transition de phase. Mentionner les diagrammes isothermes, qui marchent exactement pareil.

1.2. Interprétation à l'aide de la variance

[78] Rappel sur la variance. Calcul pour chaque zone du diagramme (sans oublier les lignes!).

1.3. Composition des phases : règle de l'horizontale

[52] Règle de l'horizontale : la composition des phases en un point se lit sur les courbes de rosée et d'ébullition. Démonstration à partir de la variance.

1.4. Quantité de matière de chaque phase : théorème des moments chimiques

[78, 52] Démonstration. Conclure qu'avec le diagramme et la quantité de matière totale on sait tout.

2. Interprétation des diagrammes

2.1. Modèle de la solution idéale

[78] Définition. Établir la loi de Raoult, et l'équation des courbes dans un diagramme isotherme.

2.2. Écart à l'idéalité

[78] Faire constater la déformation des fuseaux, jusqu'à l'apparition d'un azéotrope. Expliquer rapidement la lecture d'un diagramme avec azéotrope. Distinction entre corps pur et azéotrope.

3. Application à la distillation

3.1. Distillation simple

[78] Conclure que c'est pas très efficace.

3.2. Distillation fractionnée

[78, 52] Bien expliquer le principe et ce qui se passe à chaque endroit de la colonne. Suivre un échantillon de matière qui s'élève dans la colonne. Expliquer l'intérêt lors de la synthèse d'un corps pur.

[56] ☞ **Manip** : distillation fractionnée d'un mélange pentane-heptane. Aller chercher dans le Handbook toutes les données nécessaires. Comparer à la manip introductive : ça marche vachement mieux.

3.3. Application aux pétroles

[147] Expliquer le principe et les deux distillations sous pression atmosphérique et sous pression réduite.

3.4. Distillation azéotrope

[78, 52] Expliquer le principe et les limitations. Exemple de l'acide nitrique qu'on ne récupère jamais pur.

Conclusion

Ouvrir sur les applications très vastes

LC31 : Lecture et illustrations des diagrammes d'Ellingham ; application à la pyrométallurgie. (CP)

♣ Bibliographie

[52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy

[78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Thermochimie

Oxydoréduction

Construction des diagrammes d'Ellingham

♣ Idées à faire passer

On généralise des méthodes déjà vues en solution aqueuse

Approximation suffisante en vue d'applications industrielles

Réalisation industrielle

♣ Plan

Introduction

On trouve les métaux sous forme oxydée : il faut réduire les oxydes.

1. Droite d'Ellingham d'un couple métal/oxyde

1.1. Rappel : approximation d'Ellingham

Définir le problème sur l'exemple de Zn/ZnO : équation d'oxydation avec nombre stœchiométrique de 1 pour le dioxygène. Rappeler l'approximation.

Redéfinir le diagramme d'Ellingham $y = f(T)$ et la droite d'Ellingham d'un couple $y = \Delta_r G^\circ(T)$.

1.2. Propriétés des diagrammes

Continuité lors des changements d'état ($\Delta_{\text{fus}} G^\circ = 0$) et rupture de pente. Segments parallèles à basse température. Signe de la pente. Commenter avec des exemples pour Zn, Cu et C.

2. Lecture des diagrammes d'Ellingham

2.1. Métal et oxyde à l'état condensé

Cas où métal et oxyde sont en phase condensée : calculer la variance, calculer l'affinité. Domaines d'existence. Pression de corrosion, température limite de corrosion.

[93] ☞ **Manip** : corrosion du fer par le dioxygène. Mentionner que le chauffage ne sert que pour la cinétique.

2.2. Métal ou oxyde à l'état gazeux

Cas d'éléments sous forme gazeuse : idem à faire sur transparent, domaines de prédominance.

2.3. Superposition de deux courbes

Calcul de l'affinité (phase condensée ou phase gazeuse) sur l'exemple du carbone. Interprétation en termes de domaines disjoints. Traiter le diagramme du carbone en entier. Température d'inversion à définir.

[93] ☞ **Manip** : formation de Cu par C.

3. Pyrométallurgie

3.1. Principe et intérêt

On trouve les métaux sous forme oxydée.

[93] ☞ **Manip** : aluminothermie.

3.2. Pyrométallurgie du zinc

Justifier l'intérêt du zinc. Détailler les étapes et le choix du réducteur. Haut-fourneau.

Conclusion

Autre voie = hydrométallurgie (rédox en solution), mais qui commence aussi par de la pyrométallurgie.

♣ Remarque

Cette leçon a été testée. Il faut aller vraiment vite sur la partie 1, et utiliser des transparents quand nécessaire.

LC32 : Hydrométallurgie. (CP)

♣ Bibliographie

[52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy : permet de détailler le principe chimique et d'avoir les courbes sur lesquelles s'appuyer.

[143] BUP 770, *Une vie de zinc*, J.L. Vignes, janvier 1995 : contient le protocole de toutes les manip

[144] BUP 857, *L'hydrométallurgie*, J.L. Vignes, octobre 2003 : des détails techniques, des illustrations concrètes. Très intéressant à lire.

♣ Pré-requis

Pyrométallurgie

Diagrammes $E - \text{pH}$

Courbes $i - E$

♣ Idées à faire passer

Illustrer $E - \text{pH}$ et $i - E$

Discuter le principe chimique, qui s'applique industriellement

Le choix des électrodes ne se fait pas au hasard

♣ Plan

Introduction

On a vu la pyrométallurgie. L'essentiel de la production de zinc se fait par hydrométallurgie. On illustre expérimentalement sur le cas du zinc, mais on discute aussi le cas d'autres métaux.

1. Du minerai à la solution aqueuse

1.1. En amont de l'hydrométallurgie : flottation et grillage

Flottation. Grillage. On obtient la calcine.

1.2. Mise en solution : lixiviation

☞ **Manip** : partir de la calcine toute faite.

2. Purification

2.1. Par précipitation d'hydroxydes

Interpréter avec les diagrammes $E - \text{pH}$. ☞ **Manip** : procédé à la jarosite. Montrer le principe, puis reprendre le résultat de la préparation car c'est long.

2.2. Cémentation

Expliquer avec les courbes $i - E$. ☞ **Manip** : cémentation puis filtration.

3. Réduction par électrolyse

3.1. Choix des électrodes

Nécessité de la cémentation préalable.

Choix de la cathode : il faut que le couple de l'eau ne soit pas gênant (les ions sulfate ne posent problème sur aucun type d'électrode) + pelage facile du zinc (d'où choix Al).

Choix de l'anode : inattaquable en milieu sulfate.

3.2. Réalisation

☞ **Manip** : prévoir une solution directement électrolysable si les manip précédentes ratent.

Éventuellement si temps : rendement faradique.

Conclusion

Schéma récapitulatif, ouvrir à d'autres types de métallurgie.

LC33 : Application des diagrammes potentiel-pH (construction exclue). (CP)

♣ Bibliographie

- [28] *Des expériences de la famille redox*, D. Cachau-Hereillat
 [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [134] *L'oxydoréduction*, J. Sarrazin
 [143] BUP 770, *Une vie de zinc*, J.L. Vignes, janvier 1995 : contient le protocole de toutes les manip

♣ Pré-requis

Construction des diagrammes $E - \text{pH}$
 Dosages indirects

♣ Idées à faire passer

Les diagrammes $E - \text{pH}$ permettent de prévoir les réactions thermodynamiquement possibles.

♣ Plan

Introduction

[134] ☞ **Manip** : variation du pouvoir oxydant de l'ion permanganate avec le pH. On voit que le pH a une influence sur l'oxydoréduction.

1. Lecture des diagrammes

1.1. Rappels

Prédominance/existence, concentration de tracé, informations thermodynamiques. Thermodynamique et pas cinétique.

1.2. Préviation des réactions redox

Interpréter la manip. d'intro.

[52] exo corrigé. Eau de Javel : dismutation à pH acide.

[28] ☞ **Manip** : pouvoir oxydant des halogénures, eau de chlore dans iodure en excès ou iodure dans eau de chlore en excès. Montrer l'état final sur le diagramme (courbe de coexistence).

1.3. Stabilité dans l'eau

Diagramme de l'eau (attention, pas un $E - \text{pH}$ mais celui de O et celui de H). Zone de stabilité. Appliquer à la corrosion (uniforme).

Mentionner la cinétique : élargissement du domaine de stabilité.

2. Application aux dosages : méthode de Winkler

2.1. Principe et objectif

[78] exo corrigé. Contrôle de qualité de l'eau. Bilan de matière : raisonner sur une équation de bilan globale. Prendre le temps de bien expliquer le dosage, il y a des choses piègeuses.

2.2. Réalisation expérimentale

[97] ☞ **Manip** : faire le dosage et l'exploiter.

3. Application à l'hydrométallurgie [143, 78]

Prendre l'exemple du zinc.

3.1. Principe de l'hydrométallurgie

Bref rappel sur les objectifs et les différentes étapes.

3.2. Lixiviation

Objectif et principe.

☞ **Manip** : si temps. Privilégier l'explication et l'interprétation avec les diagrammes.

3.3. Cémentation

Objectif et principe.

☞ **Manip** : si temps. Là encore privilégier l'explication, attention à la gestion du temps pour ne pas être trop court.

Conclusion

Ouvrir sur l'importance de la cinétique, et les transformations forcées qu'on ne peut pas décrire ainsi.

♣ Remarque

Je trouve cette leçon vraiment pas fantastique, elle mériterait qu'on lui consacre à nouveau du temps.

LC34 : Application des courbes intensité-potentiel. (CP)

♣ Bibliographie

- [28] *Des expériences de la famille redox*, D. Cachau-Hereillat
 [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [67] *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**, R. Fournié : ancienne édition de chez Dunod
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [134] *L'oxydoréduction*, J. Sarrazin

♣ Pré-requis

Thermodynamique des réactions redox
 Tracé des courbes $i - E$

♣ Idées à faire passer

La thermodynamique propose des réactions, la cinétique impose celle qui a effectivement lieu.

♣ Plan

Introduction

Importance de la cinétique en redox : la rouille n'est heureusement pas instantanée.

1. Rappels sur la lecture des courbes $i - E$

- [52] Rapide sur transparent : système lent, rapide, surtension à vide, pallier de diffusion, mur du solvant.
 ⚠ **Attention** : système = couple rédox + électrode.

2. Réactions spontanées

- [52] ⚡ **Manip** : blocage cinétique réaction de HCl sur Pb. Dégagement gazeux avec un fil de platine.
 [28] ⚡ **Manip** : idem avec Mg ou Zn.
 Potentiel mixte.

3. Piles et accumulateurs : exemple de l'accumulateur au Plomb

- [97] ⚡ **Manip** : à faire quantitativement. [67] exo corrigé donne les courbes $i - E$, et [134] donne les valeurs numériques. Bien décrire le mouvement des porteurs de charge, montrer que le couple de l'eau n'est pas gênant à cause des surtensions.

3.1. Décharge

Bien décrire le mouvement des porteurs de charge. Interpréter par tracé des courbes $i - E$.

3.2. Charge

A nouveau bien décrire le mouvement des porteurs de charge. Montrer que le couple de l'eau n'est pas gênant à cause des surtensions. On récupère moins d'énergie en décharge que ce que l'on a fourni en charge. Écrire le bilan $U = \Delta E_{\text{thermo}} + \Delta \eta_{\text{cin}} + Ri$.

4. Électrolyse

- [97] ⚡ **Manip** : électrolyse de l'eau salée. Avoir en tête le processus industriel à cathode de mercure : on forme Cl_2 , et $\text{Na}(\text{Hg})$ que l'on oxyde ensuite en mettant de l'eau pour former de la soude.

Conclusion

Ouvrir sur la corrosion

♣ Remarque

- ▷ Faire attention à opposer à chaque fois explicitement thermo et cinétique. Chaque expérience est présentée de la façon suivante :
 - a) Liste des couples présents
 - b) Réaction prévue par la thermo
 - c) Observation expérimentale
 - d) Interprétation avec les courbes $i - E$
- ▷ S'abstenir de dessiner des courbes $i - E$ à la va-vite au tableau, il y a toutes les chances de faire des erreurs.

LC35 : Corrosion humide et protection des métaux contre la corrosion. (CP)

♣ Bibliographie

- [52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy
 [67] *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**, R. Fournié : ancienne édition de chez Dunod
 [78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias
 [93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [134] *L'oxydoréduction*, J. Sarrazin

♣ Pré-requis

Diagrammes $E - \text{pH}$
 Courbes $i - E$
 Oxydoréduction

♣ Idées à faire passer

Corrosion uniforme vs. différentielle
 De façon basique, la protection consiste à contrer un à un les facteurs de corrosion

♣ Plan

Introduction

[52] Situer l'importance économique de la corrosion.

1. Corrosion humide : définition et origine [78]

1.1. Phénomène de corrosion

Définition. Corrosion sèche et humide.

1.2. Facteurs de la corrosion humide

Lister tous les facteurs.

1.3. Protection physique contre la corrosion

Idée basique : isoler physiquement le métal à protéger de l'environnement corrodant. Revêtement type peinture, laquage ... Mais insuffisant dès qu'il y a une rayure.

1.4. Corrosion uniforme et différentielle

Parler de « 2 types de zones » plutôt que « 2 zones ».

2. Corrosion uniforme

2.1. Thermodynamique de la corrosion

[78, 67] Définir domaines d'immunité, de passivité et de corrosion. Convention de tracé du diagramme $E - \text{pH}$.

☛ **Attention** : la plupart des livres ne tiennent pas compte d'un petit domaine dans le diagramme $E - \text{pH}$ du fer, ce qui déplaît aux correcteurs susceptibles. [67] le fait correctement.

[97] ☛ **Manip** : passivation du fer par les ions nitrate.

2.2. Protection électrochimique

Anodique et cathodique : on impose au système d'être dans son domaine d'immunité ou de passivation.

2.3. Cinétique de la corrosion, anode sacrificielle

[97] ☛ **Manip** : paille de fer + zinc dans HCl. Interpréter avec courbes $i - E$. Penser à dégraisser la paille de fer à l'acétone et attendre le temps qu'il faut, la réaction ne démarre pas immédiatement.

[93] ☛ **Manip** : démonter un chalutier pour récupérer son anode sacrificielle.

3. Corrosion différentielle

3.1. Hétérogénéité de concentration

[93] pour la recette. ☛ **Manip** : clou dans un tube à essais avec agar agar. Réaliser la manip sur plein de clous et montrer les plus jolis.

[52] Interprétation : micropile de corrosion, sens des porteurs de charge.

3.2. Hétérogénéité de surface

[93] pour la recette, [134] pour la manip. ☛ **Manip** : clou tordu dans la boîte de Pétri. Réaliser la manip sur plein de clous et montrer les plus jolis.

3.3. Protection métallique en surface

Montrer en quoi ça résout des problèmes. Méthodes de dépôt : galvanisation (jusqu'aux camionnettes), électro-zinguage (pour tout ce qui est plus gros, ou qui a besoin d'être plus précis).

♣ Remarque

S'abstenir de dessiner des courbes $i - E$ à la va-vite au tableau, il y a toutes les chances de faire des erreurs.

LC36 : Exemples de mécanismes en chimie organique : additions électrophiles sur la double liaison carbone-carbone. (CP)

♣ Bibliographie

[54] H-Prépa Chimie PCSI 1ère période, A. Durupthy : pour les aspects théoriques

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal : pour les manip

♣ Pré-requis

Stéréochimie

Profil réactionnel et postulat de Hammond

Bases de la réactivité organique : électrophilie, nucléophilie, ...

♣ Idées à faire passer

Un électrophile et un nucléophile réagissent ensemble

On peut rationaliser les résultats expérimentaux

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : test des alcènes à l'eau de brome.

1. Structure et réactivité de la double liaison C=C

Rapide, globalement sur transparent. Géométrie, stéréochimie, énergie de liaison. Réactivité : nucléophilie.

2. Addition de dihalogènes sur la liaison C=C

2.1. Résultats expérimentaux

Prendre un exemple. Bilan. Stéréosélectivité (à définir), stéréospécificité.

Application au test à l'eau de brome.

2.2. Mécanisme

Rappeler la définition des flèches. Interpréter la stéréochimie.

2.3. Profil réactionnel

Profil, postulat de Hammond. Influence des substituants et du solvant.

3. Réaction avec un composé de type H-A : hydratation et hydrohalogénéation

3.1. Hydratation

Présentation de la manip et bilan réactionnel.

[93] ☞ **Manip** : hydratation d'un alcène, suivi par réfractométrie. ⚠ **Attention** : il y a une erreur dans le JFLM, on commence par vaporiser l'alcène qui n'a pas réagi avant l'alcool (voir les températures d'ébullition dans un Handbook). De plus si on chauffe trop (ou trop longtemps?) on peut aussi déshydrater l'alcool formé, ce qui déplace la double liaison sur l'alcène, et les indices de réfraction ne sont plus les bons.

Mécanisme. Stéréochimie, stéréosélectivité.

3.2. Hydrohalogénéation

Rapide, sur transparent au cas où on manque de temps.

Conclusion

Grande application : synthèse des polymères.

♣ Remarques

▷ Éviter les *R* et *R'* dans les écritures.

▷ Le mécanisme d'hydratation est en réalité plus compliqué : on commence par former un ester inorganique avec un ion sulfate, qu'on hydrolyse ensuite.

LC37 : Conformations et configurations ; illustrations expérimentales. (CP)

♣ Bibliographie

[54] H-Prépa Chimie PCSI 1ère période, A. Durupthy : pour les aspects théoriques

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal : pour les manips

♣ Pré-requis

Représentation des molécules (formule semi-développée, Cram, Newmann, ...)

Règles de CIP

Liaison hydrogène

Titrage pH-métrie

♣ Idées à faire passer

Une molécule = une formule brute + une configuration = une infinité de conformations

Les propriétés macro sont gouvernées par la structure micro

♣ Plan

Introduction

Comparer deux molécules : nature des atomes (formule brute), ordre des liaisons (développée) et disposition spatiale.

1. Notion de configuration d'un centre stéréogène

1.1. Rappel des règles CIP

Subliminal sur transparent. C'est malheureux, mais nécessaire pour finir la leçon dans les temps.

1.2. Descripteurs stéréochimiques

Descripteurs *R/S* et *Z/E*.

2. Stéréoisomérisation de configuration

2.1. Énantiomérie et diastéréoisomérisation

Définition : relation d'énantiomérie et de diastéréoisomérisation. Ne pas parler de chiralité à ce stade.

Donner des exemples de plusieurs types : deux carbones asymétriques, double liaison, cycle, ...

Avoir un énantiomère et avoir un carbone asymétrique ne sont pas deux choses équivalentes. Écrire tous les stéréoisomères de l'acide tartrique pour l'illustrer.

2.2. Propriétés d'un couple de diastéréoisomères

Deux diastéréoisomères ont des propriétés physiques et chimiques différentes, ce sont des molécules différentes.

[93] ☞ Manip : acides fumariques et maléiques. Point de fusion et dosage.

[à savoir] ☞ Manip : modèles moléculaires.

2.3. Propriétés d'un couple d'énantiomères

Deux énantiomères ont exactement les mêmes propriétés physiques, à part le pouvoir rotatoire spécifique.

[93] ☞ Manip : température de fusion de l'acide tartrique

2.4. La chiralité, ou comment distinguer deux énantiomères

Définir la chiralité (propriété structurale) et l'activité optique (propriété physique).

[93] ☞ Manip : loi de Biot. Détailler : dextrogyre et lévogyre ...

[93] ☞ Manip : odeur du +/- limonène. Propriétés biologiques.

2.5. Dédoublage de racémique

Si temps. Principe : pour séparer deux énantiomères, il faut passer par une situation de diastéréoisomérisation.

Analogie du pied dans la chaussure : deux pieds sont deux énantiomères, mais un pied droit dans une chaussure droite et un pied droit dans une chaussure gauche sont deux diastéréoisomères.

Revenir sur le fait que les capteurs olfactifs sont chiraux, puisqu'ils distinguent deux énantiomères.

3. Stéréoisomérisation de conformation

3.1. Définition

Une conformation = pour une même molécule (pas de rupture de liaisons).

3.2. Cas de l'éthane

☞ **Manip** : modèle moléculaire. Montrer et définir les conformations extrêmes.

ODG de barrière énergétique avec kT . Éviter les pourcentages mal définis : la majorité des molécules sont dans des conformations intermédiaires entre les décalées.

3.3. Cas du butane

☞ **Manip** : modèle moléculaire. Définitions, ODG.

Conclusion

Revenir sur les propriétés biologiques, qui orientent la synthèse organique de médicaments.

♣ Remarque

Certains choix dans ce plan sont assez personnels (notamment la place de la chiralité), et surement discutables, bien qu'ayant été proposés par un correcteur ENSL.

♣ Bonus : définitions

Stéréoisomérisation : relation existant entre deux molécules de même formule brute mais de configurations différentes.

Énantiomérisation : relation existant entre deux molécules images l'une de l'autre dans un miroir.

Diastéréoisomérisation : relation existant entre deux molécules stéréoisomères mais pas énantiomères.

Chiralité : une molécule est chirale si elle possède un énantiomère de configuration différent d'elle-même. C'est une propriété structurale, propre à une molécule. L'activité optique est la propriété physique associée à cette caractéristique structurale. Le pouvoir rotatoire spécifique est la seule grandeur physique (le seul nombre mesurable) distinguant deux énantiomères placés dans un environnement achiral.

☞ **Attention** : la chiralité et l'activité optique sont des propriétés structurale et physique intrinsèques à *une* seule espèce, alors que l'énantiomérisation est la relation entre *deux* espèces.

LC38 : Macromolécules. (CP)

♣ Bibliographie

[52] H-Prépa Chimie PC-PC*, A. Durupthy

[78] Tec&Doc Chimie PC-PC*, P. Grécias

[82] Méthodes et annales Chimie PSI-PSI*, P. Grécias : contient l'essentiel du contenu de la leçon, mais de façon beaucoup plus synthétique que dans les livres de PC, qui ne servent qu'à des compléments hors-programme en PSI.

[93] *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

♣ Pré-requis

Cinétique

Réactivité en chimie organique

Stéréochimie

♣ Idées à faire passer

Contrôle des propriétés selon voie de synthèse

Relations entre structure et propriétés

♣ Plan

Introduction

Montrer des exemples (P.M.M.A., P.S., téflon, macromolécule biologique).

1. Description d'un polymère

1.1. Définitions

Macromolécule, polymère, motif, monomère. Donner des exemples.

1.2. Description statistique

DPN, DPW, masses molaires moyennes, indice de polymolécularité. Tracer la courbe $N_k = f(M_k)$ et y positionner les masses molaires.

1.3. Organisation topologique

Homopolymères : linéaire, ramifié, en étoile. Copolymères : par bloc, alterné, statistique, greffé.

1.4. Tacticité

Définition et illustration sur l'exemple du P.M.M.A.

2. Synthèse des polymères

2.1. Différents types de polymérisation

En chaîne ou par stades, polyaddition ou polycondensation. Seule la polyaddition en chaîne anionique est au programme, mais pour des raisons expérimentales et d'importance industrielle on montre une polymérisation radicalaire.

[93] 🧪 **Manip** : polycondensation du nylon.

2.2. Synthèse du P.M.M.A. : bilan et mécanisme

Donner le bilan global, écrire le mécanisme. Régiosélectivité tête à queue, plutôt atactique (carbanion plan, mais compliqué). Influence du solvant : polymère vivant si aprotique (pas de terminaison).

2.3. Cinétique de la polymérisation

Traiter avec terminaison (ou sans selon le temps).

3. Structure et propriétés des polymères

3.1. Interactions entre macromolécules

Interactions par liaison hydrogène et de van der Waals. Pelote statistique, enchevêtrement des pelotes.

3.2. Transition vitreuse

Zones amorphes et cristallites. Courbe d'évolution du module d'Young en fonction de T , interprétation avec les interactions intermoléculaires.

🧪 **Manip** : tuyau de caoutchouc (type tuyau de réfrigérant) dans l'azote liquide.

Parler des différents domaines d'utilisation.

3.3. Thermoplastiques et thermodurcissables

Définition, parler de réticulation.

☞ **Manip** : thermoformage d'un pot de yaourt chauffé au bec électrique, c'est un thermoplastique (se déforme quand on chauffe).

Conclusion

importance industrielle et biologique.

♣ Remarque

J'ai testé cette leçon, et elle est très longue. Pour raccourcir, je pense que la partie sur l'organisation topologique des chaînes peut être sautée. De même, la plupart des schémas doivent être faits sur transparent.

Troisième partie
Montages de physique

Préambule aux plans de montages

Contrairement aux deux parties précédentes qui sont mes plans « bruts », cette partie sur les montages a été retravaillée en 2012-2013. Une fraction non négligeable de mes plans originaux ne me semblait pas satisfaisante, surtout par manque de recul. Je pense que c'est (un peu) mieux désormais, mais ça reste à prendre avec précautions.

Encore plus que les parties concernant les leçons, cette partie ne contient vraiment que des notes. Elle contient de façon succincte une liste d'expériences, ainsi que quelques commentaires sur leur réalisation pratique. En fait je pense que l'essentiel dans l'épreuve de montage est de bien maîtriser tous les aspects des expériences que l'on présente, ce qui n'est possible qu'en travaillant directement sur les manips, et impossible à répéter sur des fiches.

Il faut noter qu'un bon nombre de ces expériences ne se trouvent pas « telles quelles » dans les livres. Les protocoles ont été adaptés au matériel de l'ENS Lyon, pour simplicité ou pour mieux illustrer certains phénomènes. Certains commentaires peuvent donc paraître cryptiques pour quelqu'un ne connaissant pas le matériel lyonnais, voire pour quelqu'un d'autre que moi . . .

Enfin pour toutes ces raisons là le symbole [à savoir] est souvent sous-entendu :)

MP01 : Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.

♣ Bibliographie

[49] *Expériences de physique au CAPES*, R. Duffait

[117] *Mécanique*, J.P. Pérez : pour les expressions des moments d'inertie

[123] Quaranta tome I, *Mécanique*

♣ Idées à illustrer

Les variations des grandeurs cinétiques sont liées aux efforts appliqués sur le système
Leur mesure peut permettre de remonter à des grandeurs intrinsèques

♣ Plan

Introduction

Définition des grandeurs cinétiques, lien aux efforts via le PFD (qui contient TRC, TMC et TEC)

1. Chute libre

§ **Manip** : chute libre d'une bille, dispositif avec capteurs ENSL

1.1. Variation de la quantité de mouvement

On déplace les capteurs et on recommence plusieurs fois. Acquisition sous Synchronie. A partir de la loi $z(t)$ mesurée on remonte à la valeur de g .

1.2. Conservation de l'énergie mécanique

Dérivée de $z(t)$ pour connaître la vitesse. On montre la conversion $E_p \rightarrow E_c$ et la conservation de E_m .

2. Choc élastique

2.1. Préambule : mouvement d'un mobile isolé

§ **Manip** : lancer un mobile tout seul sur la table à coussin d'air. Permet d'estimer l'incertitude sur la table à coussin d'air : la trajectoire doit être rectiligne uniforme, l'écart à ce résultat est l'incertitude minimale sur les mesures à table à coussin d'air (environ 10%)

2.2. Conservation de la quantité de mouvement

§ **Manip** : alourdir un des mobiles, et lancer le lourd contre le léger. Montrer que le système composé des deux mobiles est isolé, donc que le centre d'inertie a une trajectoire rectiligne uniforme. Par contre, la quantité de mouvement de chacun des mobiles n'est pas conservée.

2.3. Étude énergétique

Montrer que $E_c^{\text{tot}} = E_c^{(1)} + E_c^{(2)}$ se conserve, au contraire de $E_c^{(1)}$ et $E_c^{(2)}$ individuellement.

3. Mouvement à force centrale conservative

§ **Manip** : relier les deux mobiles autoporteurs par un ressort, et en fixer un.

3.1. Conservation du moment cinétique : loi des aires

Vérifier la loi des aires en mesurant l'aire des triangles.

3.2. Conservation de l'énergie

Force conservative donc $E_c + E_p = \text{cte}$. Étude quantitative à faire soi-même si temps pour remonter à la raideur du ressort.

4. Pendule pesant

§ **Manip** : oscillations d'un pendule pesant, dispositif ENSL « pendule grand angle »

4.1. Mesure du moment d'inertie

Equilibrer statiquement le pendule (déjà presque fait). Ajouter une masse connue. Mesurer le moment d'inertie par la période propre des oscillations, via une TF.

[117] Comparaison à la valeur théorique. Ne pas trop se prendre la tête, beaucoup de termes sont négligeables.

4.2. Étude énergétique

Montrer que l'énergie n'est pas conservée : elle est convertie en énergie interne par frottements.

♣ Remarques

- ▷ Attention au pendule grand angle : mettre la masse du côté qui va bien (discontinuité du potentiomètre), et régler soigneusement l'offset pour l'étude énergétique.
- ▷ Nous avons préparé et présenté ce montage à la classe en cours d'année. Il est un petit peu long (mais gérable). Les correcteurs avaient recommandé de très bien expliciter le lien entre les expériences choisies, le traitement qui en est fait et le titre du montage.
- ▷ Le jury apprécierait des expériences « vie courante », ce à quoi nous n'avions pas eu le temps de réfléchir.

MP02 : Phénomènes de surface.

♣ Bibliographie

[84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : *a priori* la nouvelle édition (verte) est plus complète.

[132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Plan

Introduction

Armoire que l'on pousse, gouttes à la sortie d'un robinet (Rayleigh-Plateau), gouttes sur un nénuphar.

1. Frottements solides

1.1. Mise en évidence

☞ **Manip** : blocs sur un plan incliné pour illustrer les lois de Coulomb. Hystérésis des lois de Coulomb.

1.2. Stick-slip

[132] pour les aspects théoriques. ☞ **Manip** : dispositif (bricolage) ENSL. Acquisition sur VidéoCom. Remonter aux deux coefficients de frottement.

2. Tension de surface

2.1. Mise en évidence

☞ **Manip** : anneau métallique + fil qui se tend lorsqu'on crève le film de savon d'un côté.

2.2. Mesure : anneau de Gouy

[84] ☞ **Manip** : mesure de γ pour l'eau et l'éthanol. Traitement statistique des incertitudes.

2.3. Ondes gravito-capillaires

[84] ☞ **Manip** : cuve à ondes de surface. Déterminer le grandissement du système de projection de la cuve, puis la relation de dispersion. Remonter à une valeur de tension de surface.

3. Contact à trois phases

3.1. Montée capillaire

☞ **Manip** : loi de Jurin, dispositif ENSL. Utiliser de l'éthanol qui permet d'avoir une interface plus plate (cf. loi d'Young). Important d'aller d'abord dans le sens du liquide montant, puis du liquide descendant (hystérésis). Relever la hauteur de montée pour plusieurs tubes, fitter pour en déduire la tension de surface.

3.2. Mouillage d'une surface solide

☞ **Manip** : projeter des surfaces de téflon et de verre, déposer une goutte dessus. Montrer l'hystérésis quand on dépose ou qu'on aspire la goutte.

Conclusion

Recherches pour optimiser les surfaces.

♣ Remarques

- ▷ Ne pas s'affoler si on ne retrouve pas la bonne valeur de tension de surface : comme elle dépend énormément des conditions expérimentales et de la propreté des liquides, c'est pas étonnant.
- ▷ Utiliser des surfaces parfaitement propres, avant chaque mesure rincer avec le liquide qu'on va utiliser, évidemment prévoir un béccher poubelle à part.

MP03 : Dynamique des fluides.

♣ Bibliographie

[84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : *a priori* la nouvelle édition (verte) est plus complète.

[123] Quaranta tome I, *Mécanique*

♣ Idées à illustrer

Variétés de fluides et de régimes d'écoulement

Ils sont à peu près caractérisés par le Re

♣ Plan

Introduction

Rappeler Navier-Stokes et le nombre de Reynolds.

1. Viscosimètre à billes : $Re \ll 1$ [84]

☞ **Manip** : viscosimètre à bille, idéalement dispositif ENSL avec l'huile de silicone étalonnée (Rotitherm).

Vitesse limite donnée par la force de Stokes. Mesure pour plusieurs diamètres de billes. Remonter à la viscosité. Comparer à la meilleure valeur trouvable dans le Handbook.

Traitement des incertitudes à soigner : étude statistique pour chaque diamètre de billes, ce qui permet de diminuer l'écart type de chaque point qui va servir au fit.

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds (justifie Stokes), temps d'amortissement du transitoire, influence des parois et du fond (chose la moins négligeable).

2. Écoulement de Poiseuille [84, 123]

☞ **Manip** : vase de Mariotte, dispositif ENSL.

Mesure du débit en fonction de la différence de pression et en fonction de la longueur du tube. Comparer à la loi de Poiseuille. En déduire la viscosité de l'eau.

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds (justifie que le profil reste laminaire et n'est pas turbulent).

La longueur d'établissement du profil non négligeable explique la déviation à la loi de Poiseuille aux faibles longueurs de tube.

3. Écoulement d'air en soufflerie

☞ **Manip** : soufflerie

3.1. Tube de Pitot

Mesure de la vitesse à l'anémomètre à fil chaud, et de la surpression à la sonde Pitot. Vérifier Bernoulli.

3.2. Force de traînée

Au choix et suivant le temps : la force dépend du profil (travail à surface et v fixé), la force est en $v^2 \dots$

Conclusion

Profilage des voitures, des avions et de Lance Armstrong (ou Bradley Wiggins).

♣ Remarque

Les expériences sont assez faciles et il est important de tout discuter du mieux possible.

MP04 : Thermométrie.

♣ Bibliographie

[126] Quaranta tome II, *Thermodynamique*

♣ Idées à illustrer

Mesure vs. repérage de température, rôle des étalons
Propriétés d'un thermomètre
Différents types de thermomètres

♣ Plan

Introduction

[126], article « échelles thermométriques ». Température comme grandeur repérable : interpolation linéaire entre deux points fixes (échelle Celsius par exemple) à opposer à la température comme grandeur mesurable : une seule mesure permet d'accéder à la température définie de façon absolue par la thermodynamique.
Thermomètre : corps dont une des caractéristiques dépend de T . Qualités d'un bon thermomètre : faible capacité thermique pour ne pas trop perturber T , bonne sensibilité, idéalement réponse linéaire, temps de réponse court.

1. Thermomètre primaire : tube de Kunt

But : réponse connue par une loi physique, pas d'étalonnage nécessaire.

☞ **Manip** : idem qu'en acoustique, cf MP33, mais l'exploitation diffère. Déduire de chaque mesure la vitesse du son, puis la température par $c = \sqrt{\gamma RT/M}$. Tracer la température « absolue » ainsi mesurée en fonction de la température donnée par le thermocouple.

2. Thermomètres secondaires utilisant des phénomènes thermoélectriques [126]

But : une caractéristique comme grandeur thermométrique, à étalonner avec idéalement des points triples. Ici on utilise ce qui est aisément accessible, des équilibres entre deux phases dont on a (soi-disant) mesuré $T(P)$ avec un thermomètre primaire.

2.1. Thermistance Pt100

L'idée est d'étudier ce thermomètre particulier en entier et de le caractériser du mieux possible au point de vue métrologique.

☞ **Manip** : montage 4 fils pour la Pt100 à discuter, et à construire à la main pour montrer que le courant doit être faible ($i_{\max} \sim 100$ mA). Parler de fidélité et de justesse. Traiter des incertitudes.

☞ **Manip** : relever la résistance pour mélange eau/glace, azote liquide, eau bouillante. Ajuster à une loi quadratique. Dans un monde idéal, il faudrait trouver d'autres points fixes à d'autres températures intermédiaires pour montrer que ça marche bien. Je n'ai pas d'idée sur les produits qui conviendraient (notamment au niveau coût et pollution).

2.2. Comparaison de différents thermomètres

☞ **Manip** : tout le monde (CTN, CTP, TC, alcool) dans le bain thermostaté avec Pt100 qui sert de référence. 🚫

Attention : le thermomètre à alcool est à compensation de colonne émergée, il y a dessus un repère du niveau d'eau auquel il doit être.

Discuter le principe physique de fonctionnement de chaque thermomètre.

Linéarité : à présenter pour tous les thermomètres

Sensibilité : à traiter pour la Pt100 et le thermocouple. Déf : $s = \frac{1}{X} \frac{dX}{dT}$ avec X grandeur mesurée. 🚫 **Attention**

: le $1/X$ n'est pas présent partout, mais est nécessaire pour pouvoir comparer entre eux deux thermomètres.

Temps de réponse : comparer les thermomètres (critère : réponse à 10%). ☞ **Manip** : qualitative. Commenter l'importance du conditionnement.

3. Pyromètre à filament commercial

☞ **Manip** : si temps, couleur du fer chauffé avec la manip de recalescence (Quaranta donne les couleurs selon T).

☞ **Manip** : mesurer la puissance rayonnée par l'ampoule de tungstène avec la thermopile, mesurer la température du filament avec le pyromètre, essayer de remonter à la loi de Stefan. C'est la seule méthode qui marche à peu près, l'utilisation de la formule magique du Quaranta foire et la mesure de la puissance électrique fournie à l'ampoule aussi.

Conclusion

Revenir sur le caractère perturbatif et la nécessité d'équilibre thermodynamique.

♣ Remarques

- ▷ Ce montage est orienté métrologie. Deux conséquences : d'une part, il faut orienter la discussion en langage "capteurs", et d'autre part le traitement des incertitudes est essentiel.
- ▷ Le choix du tube de Kundt comme thermomètre primaire n'est pas merveilleux. Je préfère ça au thermomètre à gaz qui ne marche pas du tout, mais c'est très discutable.

MP05 : Transitions de phases.

♣ Bibliographie

[93] *La chimie expérimentale tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[126] Quaranta tome II, *Thermodynamique*

[132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz ou votre livre de spé préféré

♣ Idées à illustrer

Une transition de phase est associée à des discontinuités

Notion de coexistence = plateau pour des transitions d'ordre 2

♣ Plan

Introduction

Définir une phase, une transition de phase.

1. Transition de phase impliquant des liquides

1.1. Transition liquide-gaz de SF_6

☞ **Manip** : machine à SF_6 . Pour chaque T , mesurer le volume d'apparition de la première goutte de liquide et la pression associée, puis le volume de disparition de la dernière goutte de liquide et la pression associée. Mesurer en même temps $P(V)$ en prenant plusieurs points. Tracer les isothermes d'Andrews. En déduire la quantité de matière présente dans l'ampoule.

Estimer l'enthalpie de vaporisation à une température à choisir avec la formule de Clapeyron (pas très précis).

1.2. Transition solide-liquide de l'eau

[126] ☞ **Manip** : mesure calorimétrique de la chaleur latente de fusion de l'eau.

2. Phénomènes apparaissant à la transition

2.1. Surfusion de l'eau

☞ **Manip** : voir LP16 sur les transitions de phase. Qualitatif seulement. Mentionner l'incapacité de la thermodynamique à expliquer pourquoi on quitte l'état métastable : il faut prendre en compte les fluctuations.

2.2. Opalescence critique

☞ **Manip** : petite cellule à SF_6 . Se placer environ 2 ou 3°C au dessus de la température critique, et placer un bûcher de glace sur la cellule. Projeter l'opalescence critique. Les coordonnées du point critique sont données dans le Quaranta de thermo à l'article « vaporisation et liquéfaction ».

3. Autres transitions de phase

3.1. Transition ferro-para

☞ **Manip** : dispositif ENSL. Relever la température de transition. On trouve un peu moins que la valeur tabulée : rôle non négligeable du poids du barreau, ou de la tension du fil du thermocouple.

3.2. Transition allotropique du fer

[93, 126] ☞ **Manip** : recalescence. Qualitatif seulement

Conclusion

Application aux machines thermiques.

MP06 : Instrument(s) d'optique.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait : pour toutes les manip

[86] *Optique : une approche expérimentale et pratique*, S. Houard : essentiellement pour les définitions

♣ Idées à illustrer

Caractéristiques d'un instrument d'optique : grossissement, diaphragmes et pupilles, champ, clarté, pouvoir de résolution

♣ Plan

Introduction

Limitation de la résolution de l'œil, intérêt de la lunette astro sur laquelle on centre le montage.

1. Grossissement

🌀 **Manip** : monter la lunette. Commencer par objet à l'infini par autocollimation (critique), puis l'œil en faisant une belle image, puis monter la lunette.

🌀 **Manip** : mesure du grossissement. Si temps à la fin de la préparation, on peut re-mesurer les focales par méthode de Bessel, ou (mieux) faire la mesure de G pour plusieurs focales.

2. Diaphragmes et pupilles

🌀 **Manip** : montrer le diaphragme d'ouverture et le cercle oculaire. 🌀 **Manip** : mesure du diamètre du cercle oculaire et de sa position.

🌀 **Manip** : montrer le diaphragme de champ. Ajouter un verre de champ. Prendre une grille comme objet et compter les cases appartenant au champ de pleine lumière.

🚫 **Attention** : avec le matériel de TP, les deux lentilles sont de diamètre comparable, et il peut arriver que la même lentille joue à la fois le rôle de diaphragme d'ouverture et de diaphragme de champ. Il faut donc choisir une lentille de grand diamètre pour l'objectif, et de petit diamètre pour l'oculaire.

3. Clarté

🌀 **Manip** : mesure avec un luxmètre dans le cas d'un objet ponctuel et d'un objet étendu. Attention à ce que mesure exactement le luxmètre, regarder la notice.

4. Pouvoir de résolution

🌀 **Manip** : illustration du critère de Rayleigh. Faire une mesure de la largeur de la fente par diffraction au laser. Attention aux facteurs de grandissement qui diffèrent si on suit Duffait.

MP07 : Interférences à deux ondes ; conditions d'obtention.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Trois types de cohérence : cohérence de polarisation, cohérence spatiale, cohérence temporelle

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : prendre une fente, puis deux : on voit apparaître des franges d'interférences dans la figure de diffraction. Rappeler les conditions d'obtention des interférences, incluant l'unicité de la source physique.

1. Interféromètre à division du front d'onde : fentes d'Young

☞ **Manip** : éclairage en lumière blanche, utiliser Caliens.

On utilise le rouleau de sopalin étiquette jaune. Le faire tenir avec un diaphragme tout pourri, et coller les fentes à un bout et Caliens à l'autre. Ainsi, toutes les distances sont fixes et Caliens n'est pas parasité.

1.1. Cohérence temporelle

☞ **Manip** : avec Caliens, mesurer i en fonction de λ pour différents filtres interférentiels. Remonter à a , et comparer. L'expérience est très peu lumineuse et il faut donc tout optimiser. Condenser la lumière de la QI de sorte à avoir l'éclairement maximal sur Caliens. Approcher les bifentes autant que possible de la fente source : les deux bifentes doivent être pile dans la tâche de la fente source.

1.2. Cohérence spatiale

[136] ☞ **Manip** : mettre en évidence le brouillage et l'inversion de contraste, à la fois en ouvrant la fente source et en la rapprochant des bifentes. Conclure que la cohérence spatiale tient compte à la fois de la source et de l'interféromètre. Mesurer l'angle pour lequel le contraste s'annule.

Transition : intérêt du Michelson et de la division d'amplitude.

2. Interféromètre à division d'amplitude : le Michelson [136]

2.1. Cohérence spatiale et localisation

Utiliser une lampe Hg ou Na en lame d'air, puis une QI en coin d'air. ☞ **Manip** : montrer la localisation, en déplaçant l'écran ou en utilisant une lentille de projection (ce qui permet d'aller voir à l'intérieur du Michelson).

2.2. Mesure de la largeur spectrale d'une raie

☞ **Manip** : ☞ **Manip** : configuration lame d'air, lampe Hg, raie verte isolée avec une gélatine. Chariotter avec le moteur, acquérir avec Caliens et faire la FFT. Si ça rate, on peut chariotter à la main, mesurer le contraste pour des valeurs bien choisies et se contenter d'une discussion qualitative. On doit aboutir à une gaussienne, de laquelle on extrait la longueur de cohérence temporelle, puis la largeur spectrale de la source. On utilise ici le théorème de Wiener-Kinchine. On peut aussi étudier un filtre interférentiel, beaucoup plus large.

3. Interférences en lumière polarisée

[46] ☞ **Manip** : expérience de Fresnel-Arago.

Conclusion

Ouvrir sur la spectroscopie et l'interférométrie astronomique.

♣ Remarques

- ▷ Expliquer à chaque fois pourquoi on a des interférences : champ d'interférence, cohérence, localisation.
- ▷ Ne surtout pas toucher aux fentes d'Young après avoir fait l'étalonnage $i(\lambda)$ en préparation.
- ▷ Il y a des incompatibilités d'humeur entre le Michelson (nain) et les pieds de lentille (géants) lyonnais. Le jour de l'oral j'ai utilisé le Michelson de Lyon et les lentilles et pieds de Cachan, c'était beaucoup plus pratique!

MP08 : Diffraction des ondes lumineuses.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Preuve irréfutable du caractère ondulatoire de la lumière

Régimes limites de Fresnel et Fraunhofer

Aspect Fourier de la diffraction de Fraunhofer

♣ Plan

Introduction

☞ **Manip** : fermer une fente éclairée par un faisceau laser (qualitatif).

1. Diffraction de Fresnel

[46] ☞ **Manip** : diffraction de Fresnel par un trou. Enlever la dernière lentille du montage de Duffait, qui est pénible et enlève l'intérêt d'une lentille de projection.

Nombre de Fresnel (c'est le k de Duffait). On peut l'annuler si $a = -b$: Fraunhofer, à l'infini et au voisinage de l'image géométrique de la source.

2. De Fresnel à Fraunhofer

[136] ☞ **Manip** : déplacer la lentille de projection et montrer le crossover entre les deux régimes.

3. Diffraction de Fraunhofer par une fente infinie

[136] ☞ **Manip** : faire le montage simple, sans lentille, et donner un ODG du nombre de Fresnel, preuve qu'on observe bien la diffraction de Fraunhofer. Mesure avec Caliens de la largeur de la tache centrale en fonction de la largeur de la fente. Remonter alors à un ODG de λ .

☞ **Manip** : montrer que Fraunhofer vérifie les propriétés de la TF (translation et dilatation), théorème de Babinet.

4. Filtrage spatial

[136] p. 128. Grille et détramage de Fourier. Passe-bas et passe-haut.

Conclusion

Diffraction des rayons X permet de remonter à la structure d'un cristal, réseaux (structures périodiques) ...

♣ Remarques

- ▷ Une fois les mesures de préparation prises, il ne faut plus toucher à la diffraction de Fresnel qui est très sensible aux distances laser-source et source-écran.
- ▷ Un choix discutable est de ne pas présenter de diffraction par un objet périodique type réseau. Je préfère me concentrer sur le filtrage, et commenter rapidement lorsqu'on montre la TF de la grille.

MP09 : Spectrométrie optique.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Principe de la spectrométrie : séparation du rayonnement en ses longueurs d'ondes

Problématique de la résolution du spectromètre

♣ Plan

Introduction

Reprendre celle du Sextant. Plan du montage : du moins précis au plus précis.

1. Spectrométrie à réseau

[136] ☞ **Manip** : discuter la résolution du réseau. Influence de la fente source, du nombre de traits éclairés, du pas du réseau, de l'ordre (changer de réseau, ouvrir la fente, ...).

☞ **Manip** : étalonnage : lampe Hg-Cd (valeurs à prendre dans [46]). Interpolation linéaire, discuter la validité de l'approximation.

☞ **Manip** : application au spectre du sodium, mesurer le $\bar{\lambda}$ du doublet, qu'on peut parfois séparer avec un bon réseau.

[136] ☞ **Manip** : application au monochromateur à réseau. Utiliser Spid-HR + lampe à H. Mesurer la constante de Rydberg à partir de la série de Balmer, en évitant de se tromper dans les ordres de la série de Balmer. Il se peut qu'il faille étalonner le spectromètre, auquel cas reprendre la lampe Hg-Cd.

2. Spectrométrie interférentielle

☞ **Manip** : Michelson en lame d'air, lampe au sodium dont on veut séparer le doublet. Utilisation du moteur. Utiliser Caliens en mode Michelson. En cas de caprice du moteur, on peut toujours le faire à la main (mais c'est moins bien).

Discuter la résolution de la TF en fonction du temps d'acquisition. Avantage par rapport au réseau : on obtient la forme du spectre avec autant de précision que l'on veut, dans le principe il suffit d'être patient.

3. Cavité confocale Fabry-Pérot

☞ **Manip** : modes du laser He-Ne. Discuter de la résolution.

Conclusion

Caractérise la source *via* l'étude de la lumière. C'est donc plutôt cool, et surtout très utilisé, p.ex. en astro.

♣ Remarques

- ▷ Si on déplace le réseau sans faire exprès, on gagnera un ticket gratuit pour le re-étalonner.
- ▷ Le montage est orienté métrologie : il importe de bien discuter des incertitudes et de la précision des différents spectromètres.

MP10 : Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait
 [136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Caractéristiques des milieux, qualitatives et quantitatives
 Les propriétés des lames dépendent de la façon dont elles ont été taillées

♣ Plan

Introduction

Milieux anisotropes, changement de propriétés

1. Biréfringence

1.1. Mise en évidence

[46] p. 143. ☞ **Manip** : rhomboèdre

1.2. Biréfringence du quartz

☞ **Manip** : mise en évidence des lignes neutres d'une lame de quartz parallèle $e = 4$ mm.

[136] p. 291. ☞ **Manip** : étude du spectre canelé, d'abord projeté puis avec Spid HR.

1.3. Mesure de l'épaisseur d'une lame de quartz

[136] p. 292. ☞ **Manip** : mesure de l'épaisseur d'une lame mince au compensateur de Babinet (quartz 60 ou 120 microns), en supposant acquis le Δn mesuré à l'expérience précédente.

1.4. Biréfringence provoquée

Touillette à café entre (P) et (A) croisés.

2. Polarisation rotatoire

2.1. Dispersion rotatoire du quartz

[46] p. 170. ☞ **Manip** : mesure du pouvoir rotatoire du quartz

2.2. Polarisation rotatoire provoquée : effet Faraday

[46] p. 174. ☞ **Manip** : mesure de la constante de Verdet du flint. Se contenter de montrer la droite si la valeur est aberrante.

Conclusion

Géologie et énantiomères

♣ Remarques

La biréfringence est à la fois le nom du phénomène et de la grandeur caractéristique Δn , alors que le phénomène de polarisation rotatoire est caractérisé par la grandeur pouvoir rotatoire α .

MP11 : Production et analyse d'une lumière polarisée.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Distinguer les différentes polarisations et le caractère total ou partiel
Production d'une lumière polarisée par des mécanismes anisotropes

♣ Plan

Introduction

Définir lumière polarisée vs. non polarisée (comparaison du temps de cohérence de polarisation et du temps de réponse du détecteur), et montrer qu'une QI n'est pas polarisée.

1. Polarisation rectiligne totale : loi de Malus

[à savoir] ☞ **Manip** : vérification de la loi de Malus. ⚠ **Attention** : à la polarisation de la photodiode et à la normalisation des résultats (cf. remarques).

2. Polarisation rectiligne partielle

2.1. Réflexion sur une lame de verre

[136] pp. 270. ☞ **Manip** : mise en évidence du caractère non-(rectiligne total). Angle de Brewster (à estimer) : là c'est rectiligne total.

2.2. Transmission par une lame de verre

☞ **Manip** : preuve du caractère rectiligne partiel. Utilisation d'un filtre interférentiel et d'une lame $\lambda/4$ dont les axes sont alignés avec (P) et (A). Mesure du taux de polarisation.

3. Polarisation elliptique

[46] p. 188. ☞ **Manip** : analyse de la polarisation en sortie d'une lame de quartz taillée parallèlement à l'axe optique. Penser à mener l'analyse jusqu'au sens de l'ellipse (même si c'est artificiel).

4. Polarisation par diffusion

[à savoir] ☞ **Manip** : diffusion par du lait entier.

♣ Remarques

- ▷ Dans chaque expérience, orienter le discours sur les deux aspects production et analyse.
- ▷ Un polariseur doit normalement s'utiliser toujours en lumière parallèle.
- ▷ Il y a un schéma récapitulatif très utile dans le Duffait p. 190.
- ▷ Pour une preuve convaincante de la loi de Malus les résultats doivent être normalisés correctement. Pour θ compris en 0 et 90°, on entrera dans Regressi :

$$A(\theta) = \frac{(V_{+\theta} - V_{\min}) + (V_{-\theta} - V_{\min})}{2(V_{\max} - V_{\min})}$$

On moyenne les valeurs $+\theta$ et $-\theta$ pour s'affranchir des problèmes de zéro. On enlève V_{\min} pour pallier les problèmes de position de la photodiode, d'imperfection des polariseurs et surtout de bruit extérieur. Enfin, on normalise par $V_{\max} - V_{\min}$ pour s'affranchir de la réponse de la photodiode. Dans cette exploitation il est crucial que V_{\max} et V_{\min} soient des points expérimentaux.

MP12 : Émission et absorption dans le domaine optique.

♣ Bibliographie

- [46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait
 [97] *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*, J.F. Le Maréchal
 [126] Quaranta tome II, *Thermodynamique*
 [136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Plan

1. Absorption

1.1. Loi de Beer-Lambert

Idée : montrer que l'absorption d'une espèce dépend de λ . Montrer la proportionnalité à la concentration.

[97] ☞ **Manip** : montrer le spectre avec et sans cuve. Estimation de l'absorption molaire de KMnO_4 à une longueur d'onde bien choisie, en faisant un fit avec différentes concentrations. Utilisation de SpidHR.

1.2. Résonance optique du sodium

Idée : montrer que l'absorption et l'émission spontanée se font à la même longueur d'onde.

[46] ☞ **Manip** : résonance de Na. Transition vers les processus d'émission.

2. Émission spontanée

2.1. Mesure de la constante de Rydberg

Idée : montrer que l'émission spontanée se fait à un ensemble *discret* de longueurs d'ondes.

[136] p. 228. ☞ **Manip** : série de Balmer d'une lampe à hydrogène. En déduire la constante de Rydberg.

2.2. Largeur de la raie du mercure

Idée : montrer que les raies sont de largeur finie, en raison des processus thermiques (Doppler, collisions).

☞ **Manip** : configuration lame d'air, lampe Hg, raie verte isolée avec une gélatine. Chariotter avec le moteur, acquérir avec Caliens et faire la FFT. Si ça rate, on peut chariotter à la main, mesurer le contraste pour des valeurs bien choisies et se contenter d'une discussion qualitative. On doit aboutir à une gaussienne, de laquelle on extrait la longueur de cohérence temporelle, puis la largeur spectrale de la source. On utilise ici le théorème de Wiener-Kinchine.

3. Émission stimulée

Idée : montrer l'autre type d'émission, en insistant sur les conditions nécessaires (exigentes) pour l'observer.

☞ **Manip** : spectre sur le côté du laser transparent avec Spid HR. On voit de l'émission spontanée.

☞ **Manip** : spectre dans le faisceau du laser transparent avec Spid HR. On voit l'émission stimulée, amplifiée et filtrée grâce à la cavité.

4. Rayonnement du corps noir

[126] ☞ **Manip** : vérification de la loi de Stefan. On mesure la température au pyromètre optique et la puissance émise à l'aide de la thermopile.

MP13 : Lasers.

♣ Bibliographie

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

[138] *Optique physique*, R. Taillet

♣ Idées à illustrer

Principe de fonctionnement d'un laser

Propriétés : directivité, monochromaticité, cohérence spatiale

♣ Plan

1. Physique de fonctionnement d'un laser

☞ **Manip** : laser transparent + Spid HR. Expliquer ce qui se passe dans chaque spectre, sur le coté et dans le faisceau. Ne pas oublier tous les rôles de la cavité.

2. Propriétés géométriques du faisceau laser

2.1. Caractère gaussien

[136] ☞ **Manip** : acquisition sous Caliens, exportée sous Regressi, quelques incantations, et on fitte.

2.2. Divergence du faisceau

[136] ☞ **Manip** : Caliens dans le faisceau laser. Mesure de $w(z)$, remonter par un fit adéquat à w_0 .

2.3. Cas de la diode laser

☞ **Manip** : montrer le profil du faisceau. En prendre non-correcté, il doit être elliptique.

3. Cohérence temporelle et modes du laser

[136] ☞ **Manip** : cavité confocale Melles-Griot pour voir les modes d'un laser He-Ne. Faire chauffer le laser longtemps à l'avance.

☞ **Manip** : idem avec une diode laser. Elle a beaucoup plus de modes car la raie d'émission est a priori beaucoup plus large.

4. Cohérence spatiale et speckle

[136] ☞ **Manip** : montrer le speckle et bien le discuter.

♣ Remarque

Être super vigilant à la sécurité.

MP14 : Photorécepteurs.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Philosophie d'un capteur et de ses propriétés

Phénoménologie de différents photorécepteurs

♣ Plan

Introduction

[136] Définir un photorécepteur, photonique/thermique.

1. Caractéristique

1.1. Photodiode

[136] ☞ **Manip** : tracé de la caractéristique d'une photodiode polarisée en inverse (Synchronie de préférence). Tester pour plusieurs flux. Commenter le choix de R (point de fonctionnement) : le courant doit varier le plus possible pour le plus de sensibilité, tout en restant dans le domaine linéaire pour tous les flux. Ainsi idéalement le choix de R est différent pour une lampe QI ou pour un laser.

1.2. Photorésistance

[46] Tracer la caractéristique au tableau, pas de manip.

2. Linéarité

2.1. Photodiode

[à savoir] ☞ **Manip** : loi de Malus. Utiliser une lampe QI + polariseur/analyseur (un laser est trop fluctuant). La loi de Malus permet de faire varier le flux. Ici l'exploitation est très différente par rapport au MP11 : on suppose acquise la loi de Malus pour étudier la photodiode.

Mesurer le courant pour deux angles opposés et faire la moyenne, mais évidemment on ne veut pas normaliser par V_{\min} et V_{\max} car le but est de capturer la réponse de la photodiode. Tracer en fonction de $\cos^2(\theta)$: c'est linéaire!

[à savoir] Sensibilité : pente de la droite. Permet de revenir sur le choix de R

2.2. Photorésistance

[à savoir] ☞ **Manip** : idem. Une photorésistance est non linéaire, mais meilleure sensibilité. La résistance se mesure à l'ohmmètre.

3. Réponse spectrale de la photodiode

[46] ☞ **Manip** : QI et filtres interférentiels. On normalise la réponse de la photodiode par celle de la thermopile. Utiliser le nanovoltmètre pour la thermopile. On trace la réponse spectrale : meilleure sensibilité dans le rouge.

☞ **Attention** : une des deux thermopiles de l'ENSL marche très mal.

4. Temps de réponse

[à savoir] [136] ☞ **Manip** : source = stroboscope. Commencer par la photorésistance : mesure du temps de montée. Passer à la photodiode : même mesure.

Discussion un peu délicate : à la photodiode, on a pu vérifier que le temps d'allumage du stroboscope n'est pas limitant pour mesurer la réponse de la photorésistance. Par contre pour le temps de réponse de la photodiode, on ne peut a priori pas conclure. Ceci dit les ordres de grandeur trouvés sont vraisemblables.

Il y a une discussion intéressante à mener si on modifie la valeur de la résistance du circuit de polarisation de la photodiode. Le temps de réponse n'est en fait pas intrinsèque à la photodiode, mais à l'ensemble photodiode + circuit de polarisation (charge d'une capacité au travers de la résistance de polarisation). On peut alors revenir sur le choix de R , qui a une contrainte supplémentaire.

Conclusion

[46] Comparer les différents photorécepteurs.

♣ Remarques

- ▷ Le montage est orienté métrologie : bien discuter les incertitudes, avoir un discours type capteur (on adapte le circuit à l'utilisation qu'on veut en faire).
- ▷ La caractéristique que l'on visualise n'est pas directement celle de la photodiode, soustraire la tension aux bornes de R .
- ▷ Si les points ne se superposent pas à la courbe, c'est que les conditions d'éclairement ont changé (dans ce cas prendre plusieurs points).
- ▷ Réponse spectrale : garder la même roue de filtre interférentiel.

MP15 : Production et mesure de champs magnétiques.

♣ Bibliographie

- [26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders
 [81] Tec& Doc Physique PCSI, P. Gréacias : théorie de l'effet Hall
 [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*

♣ Idées à illustrer

Deux grandes façons de produire les champs magnétiques : courants et aimants
 Mesure au fluxmètre et à la sonde de Hall permettent d'avoir accès à des infos complémentaires : le fluxmètre moyenne spatialement, mais il peut permettre de mesurer des champs dans la matière alors que la sonde de Hall est beaucoup plus petite, mais ne peut pas rentrer dans un matériau.

♣ Plan

Introduction

Bref historique + ODG des champs magnétiques

1. Production de champs magnétiques

On va mesurer les champs au teslamètre commercial, utilisé comme boîte noire.

1.1. Aimant permanent

☞ **Manip** : on place un aimant permanent sur la plaquette avec les petites boussoles : caractère vectoriel de \vec{B} , les lignes de champ bouclent, ODG au teslamètre.

1.2. Bobine

☞ **Manip** : mesure du champ au milieu d'une bobine, ajout d'un noyau de fer doux pour montrer que ça augmente le champ : on utilise les deux effets à la fois, courant + aimantation

1.3. Champ tournant

☞ **Manip** : trois bobines avec noyau de fer doux, boussole au milieu. Interprétation en superposition de champs magnétiques, liée à la linéarité des équations de Maxwell. Conclusion : on crée des champs avec un courant, et en jouant sur la distribution de courants, on crée le champ à volonté.

1.4. Electroaimant

Principe analogue à la bobine avec noyau : courants + aimantation. ☞ **Manip** : étalonnage de l'électroaimant, intérêt d'un matériau doux. Sens du champ.

2. Mesure de champs magnétiques

2.1. Fluxmètre

☞ **Manip** : fluxmètre relié à l'intégrateur tout monté. Etalonnage de l'électroaimant au fluxmètre. Discuter le moyennage spatial, et le fait que le champ n'est pas rigoureusement nul à l'extérieur de l'entrefer.

2.2. Sonde à effet Hall

☞ **Manip** : sonde ENS et électroaimant. Principe. Parler de fidélité et de justesse de la sonde : position orthogonale au champ, nécessité de retourner la sonde. Utilisée sans précaution, une sonde à effet Hall n'est pas un capteur juste. On ré-ré-étalonne un électroaimant pour vérifier la linéarité entre V_H et B . On en déduit la densité de porteurs.

Discuter l'intérêt : mesure locale, mais pas dans la matière.

2.3. Mesure de champ rémanent par cycle d'hystérésis

[26] ☞ **Manip** : cycle d'hystérésis d'un tore de ferro dur. Utilisation de l'intégrateur tout monté.

Conclusion

Citer des applications, moteurs, MCC, disques durs ...

♣ Remarque

Ne pas oublier que \vec{B} est un vecteur ! Il n'a donc pas qu'une norme.

MP16 : Milieux magnétiques.

♣ Bibliographie

- [26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders
 [71] *Magnétisme : statique, induction et milieux*, C. Garing
 [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*
 [126] Quaranta tome 2 *Thermodynamique*

♣ Idées à illustrer

Différents types de milieux magnétiques
 Matériaux très variés

♣ Plan

Introduction

Bref historique

1. Différents milieux magnétiques

1.1. Mise en évidence

☞ **Manip** : barreaux de Al, Bi, Fe dans l'entrefer d'un électroaimant (pièces tronconiques).

Définitions : ODG et signe de la susceptibilité + les atomes ont ou pas des moments magnétiques (d'où possibilité de transition ferro-para).

1.2. Transition ferro-para

[126] ☞ **Manip** : clou et thermocouple. Mesure de T_c en utilisant la table du thermocouple (et pas la relation linéaire).

2. Mesure d'une susceptibilité paramagnétique

[71] p. 41. ☞ **Manip** : FeCl_3 dans le tube en U.

a) Étalonner l'électroaimant.

b) Mesurer h pour différents I , une fois I croissant/une fois I décroissant pour les problèmes de capillarité.

c) En déduire la susceptibilité par régression linéaire.

Loi d'additivité de Wiedman : on peut négliger l'eau. Attention à la composition en eau de la solution pour la masse volumique. Discuter la partie hydrostatique.

N.B. : le résultat peut être à un facteur 10 près ...

3. Ferromagnétisme

3.1. Cycle d'hystérésis

[26] ☞ **Manip** : cycle d'hystérésis d'un tore. Commencer par un tore ferrimagnétique (pas de courants de Foucault : cycle pas déformé). Mesures : champ de saturation, champ rémanent, excitation coercitive. Passer au fer dur/doux.

3.2. Première aimantation

☞ **Manip** : désaimantation et première aimantation. Interprétation en domaines de Weiss.

3.3. Domaines de Weiss

☞ **Manip** : microscope polarisé + flexcam (grenat ferrimagnétique). Prendre la lame qui a un sourire dessiné dessus, c'est la mieux.

Conclusion

Citer des applications, moteurs, MCC, disques durs ... Citer la supraconductivité (diamagnétisme parfait).

MP17 : Métaux.

♣ Bibliographie

[71] *Magnétisme : statique, induction et milieux*, C. Garing

[93] *La chimie expérimentale tome 2 : chimie organique et minérale*, J.F. Le Maréchal

[126] Quaranta tome 2 *Thermodynamique*

♣ Idées à illustrer

Toutes les propriétés d'un métal

♣ Plan

Introduction

Définition propre d'un métal avec les bandes de conduction

1. Conductivité électrique

1.1. Mesure quatre fils de la conductivité du cuivre

☞ **Manip** : utiliser la bobine calibrée qui va dans l'eau. Tracer U en fct de I et faire un fit pour arriver à γ . Faire la manip pour plusieurs températures avec un bain thermostaté.

1.2. Mesure de rapports de conductivité par courants de Foucault

[71] ☞ **Manip** : chute d'aimant dans des tubes métalliques. C'est pas forcément quantitatif, mais c'est pas évident de dire pourquoi (alliages ? mais c'est peu probable aux dires des techniciens)

Mentionner les propriétés optiques, liées aux propriétés électriques

2. Conductivité thermique

[126] ☞ **Manip** : barre de cuivre en choc thermique, cf. bonus. Remonter à la conductivité thermique. Tester la loi de Wiedmann-Franz.

3. Module d'Young

☞ **Manip** : mesure du module d'Young du Dural via la mesure de la vitesse du son. Utiliser la cuve à ondes ultrasonores. Comparer à la valeur tabulée dans le Handbook, en gardant à l'esprit que le Dural est un alliage.

4. Transition de phase du fer

☞ **Manip** : recalescence. Existence d'une structure cristalline, le caractère métal est caractéristique de l'élément et pas de la variété allotropique.

Conclusion

Caractère métallique = réunion de tout ça. Les semi-conducteurs sont des conducteurs électriques mais la dépendance de γ en T varie, le diamant est un très bon conducteur thermique mais pas électrique, les polymères peuvent avoir des modules d'Young élevés.

♣ Bonus : Barre de cuivre en choc thermique

La solution du problème du choc thermique est proportionnelle à $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$, où erf désigne la fonction d'erreur. Or il se trouve que $\operatorname{erf}(1/2) \approx 1/2$. Ainsi à l'instant t où la température du point x de la barre a varié de la moitié de sa variation totale, on a la relation suivante :

$$\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \frac{1}{2}$$

On peut alors facilement remonter à D , et faire une régression linéaire en utilisant tous les capteurs de la barre.

Cette méthode est plus élégante que celle qui consiste à repérer le maximum de la dérivée, et plus fiable que l'excitation sinusoïdale qu'il est parfois difficile de réaliser. Néanmoins c'est un goût personnel, la barre de cuivre ne m'aimant pas beaucoup.

MP18 : Matériaux semi-conducteurs.

♣ Bibliographie

- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
- [124] Quaranta tome 3 *L'électronique*
- [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*
- [136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Évolution de la conductivité avec T
Dopage
Applications

♣ Plan

Introduction

Définition d'un semi-conducteur en termes de théorie des bandes, dopage

1. Influence de la température sur un SC intrinsèque

[47] p. 110, [125] p. 543. 🐛 **Manip** : étalonnage d'une thermistance CTN. Mesure de l'énergie de gap.
Discussion de l'intensité du courant pour une utilisation en thermomètre (faible pour éviter l'auto-échauffement)

2. Mesure de la densité de porteurs dans un SC extrinsèque

[124] 🐛 **Manip** : effet Hall. Remonter à la mobilité.

3. Cellule photovoltaïque

[136] p. 85. 🐛 **Manip** : étude d'une cellule photovoltaïque. Caractéristique de la cellule pour un éclairage donné (NB : c'est ni plus ni moins une photodiode dans son cadran « photopile »). Choix de la charge pour optimiser la puissance délivrée.

Mesure du flux incident et mesure du rendement.

Rq : on peut mesurer la caractéristique pour plusieurs flux.

Conclusion

Applications

♣ Remarque

Ce montage est un peu léger. Il y a probablement de meilleurs choix possibles, notamment pour la partie applications.

MP19 : Condensateurs et effets capacitifs. Applications.

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

[125] Quaranta tome 4 *L'électricité*

♣ Plan

Introduction

Composant de base de l'électronique moderne. Effet électromagnétique très général.

1. Condensateur d'Aepinus

1.1. Influence de la distance

[125] ☞ **Manip** : mesure de permittivité du vide. Discuter le rôle des bords et des fils (a priori responsables de l'écart à la valeur attendue).

1.2. Rôle du diélectrique

[125] ☞ **Manip** : si temps, ajout d'une plaque de plexiglas. Montrer au moins que la capacité change.

2. Mesure de capacité

[à savoir] ☞ **Manip** : montage type capacimètre numérique (condensateur alimenté par une tension triangle, suivi d'un convertisseur courant-tension à AO), ou à défaut multivibrateur (ancien mesureur de capacité).

3. Effets capacitifs dans un câble coaxial

☞ **Manip** : mesure de la capacité du câble avec le montage précédent.

☞ **Manip** : mesure de la vitesse de propagation et de l'impédance pour comparaison.

4. Application au filtrage

☞ **Manip** : diagramme de Bode d'un RC. Tester avec un créneau.

5. Oscillateur à portes logiques

[47] p. 200. ☞ **Manip** : oscillateur à portes NAND CMOS, utiliser le boîtier ENSL pour les portes.

MP20 : Induction, auto-induction.

♣ Bibliographie

- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
- [71] *Magnétisme : statique, induction et milieux*, C. Garing
- [124] Quaranta tome 3 *L'électronique*
- [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*

♣ Plan

1. Lois de l'induction

1.1. Loi de Lenz

☞ **Manip** : qualitative, aimant dans une bobine. Interpréter complètement, i.e. jusqu'au sens des courants en fonction du sens de l'aimant. ⚠ **Attention** : le sens du bobinage est important pour bien interpréter les signes.

1.2. Loi de Faraday

[125] ☞ **Manip** : fluxmètre sorti de l'électroaimant.

2. Mesures d'inductances

2.1. Mesure d'inductance propre

[47] Résonance d'un RLC : Lissajous ou réponse indicielle.

2.2. Principe d'un inductimètre

[124] ☞ **Manip** : montage type inductimètre numérique (bobine + grosse résistance alimentées par une tension triangle, suivi d'un suiveur à AO).

2.3. Mesure d'inductance mutuelle

[125] ☞ **Manip** : tracer M en fonction de la distance. Application au transformateur.

3. Courants de Foucault

[71] ☞ **Manip** : chute d'aimant dans des tubes métalliques. C'est pas forcément quantitatif, mais c'est pas évident de dire pourquoi (alliages? mais c'est peu probable aux dires des techniciens)

MP21 : Conversion de puissance électrique-électrique.

♣ Bibliographie

- [22] H-Prépa *Électronique PSI-PSI**, J.M. Brébec : prendre la vieille édition (verte) pour avoir les pertes séparées
 [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
 [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*

♣ Idées à illustrer

Aspect physique appliquée
 Notion de régime nominal
 Notion de rendement

♣ Plan

Introduction

Chaîne de puissance de la vie courante : centrale → maison → lampe, il faut convertir à chaque fois et avec le meilleur rendement possible

1. Le transformateur [22]

1.1. Présentation qualitative

🔗 **Manip** : deux bobines en influence mutuelle, puis sur un noyau de fer doux : ça marche beaucoup mieux. Structure d'un transfo. Loi des tensions et des courants du transfo parfait

1.2. Caractéristique en charge

🔗 **Manip** : mesure directe de rendement, car on s'intéresse au régime nominal. Constaté les pertes, dire qu'on va s'intéresser séparément à chaque type de pertes par la méthode des pertes séparées, d'où les deux sous-parties suivantes.

1.3. Pertes fer

🔗 **Manip** : courbe U_2 en fct de U_1 , lien avec le transfo parfait. Courbe P_{fer} en fct de U_1^2 .

1.4. Pertes cuivre

Courbe I_1 en fonction de I_2 et P_1 en fct de I_2^2 .

2. Redresseur double alternance [47, 125]

🔗 **Manip** : commencer par le pont de diode (alternatif → alternatif), puis lisser par un condensateur. Mesure du taux d'ondulation en fonction de $1/R$. Estimation du rendement avec des wattmètres (pas dans le Duffait).

3. Hacheur dévolteur [47]

🔗 **Manip** : montrer les chronogrammes pour expliquer le fonctionnement du circuit. Mesure de rendement (avec des multimètres car le wattmètre ne veut que du sinusoïdal). Mesure de ΔI_c en fonction de α .

Conclusion

On met toute la chaîne et une lampe au bout, en faisant très attention à ne pas faire griller la lampe.

♣ Remarques

- ▷ Utiliser absolument les valeurs nominales du transfo
- ▷ Partir du minimum de puissance quand on met la lampe

MP22 : Exemples de conversion électrique-mécanique.

♣ Bibliographie

[26] Précis Bréal *Électrotechnique PSI*, P. Brenders

[108] *Génie électrotechnique*, R. Mérat

♣ Plan

1. Conversion mécanique → électrique : exemple de la génératrice

1.1. Force électromotrice

☞ **Manip** : caractéristique à vide, mesure de $k\Phi$.

1.2. Caractéristique en charge et résistance de l'induit

☞ **Manip** : caractéristique en charge à vitesse de rotation fixée.

1.3. Couple des forces de Laplace

☞ **Manip** : mesure du couple en faisant varier la charge. En déduire $k\Phi$ à nouveau et le couple de frottement.

1.4. Rendement

☞ **Manip** : à tracer en fonction de la puissance utile (pertes séparées).

2. Conversion électrique → mécanique : le moteur asynchrone

2.1. Principe (si temps)

☞ **Manip** : trois bobines + cage d'écureuil.

2.2. Couple des forces de Laplace

☞ **Manip** : couple en fonction de la vitesse de rotation. Remonter à la fréquence du champ tournant (attention : la machine est tétrapolaire).

2.3. Rendement

☞ **Manip** : mesure avec deux wattmètres, changer l'onduleur en alternostat. Tracer le rendement en fonction de la puissance utile.

♣ Remarque

Une MCC a deux variables électriques et deux variables mécaniques, elles ne sont pas indépendantes. Bien préciser à chaque expérience quelles sont les variables que l'on fixe et celles que l'on fait varier.

MP23 : Capteurs et transducteurs.

♣ Bibliographie

- [108] *Génie électrotechnique*, R. Mérat
- [125] Quaranta tome 4 *L'électricité*
- [126] Quaranta tome 2, *Thermodynamique*
- [139] *Dictionnaire de physique*, R. Taillet

♣ Plan

Introduction

[139] Annoncer les définitions que l'on considère : transducteur = convertit une grandeur physique en une autre selon une loi déterminée, capteur = la grandeur de sortie est de nature électrique dans le but de faire une mesure.

1. Le haut-parleur

Étude d'un transducteur électro-mécanique. But : convertir du signal.

1.1. Fonction de transfert

[à savoir] ☞ **Manip** : on alimente le H.P. par une tension d'amplitude fixe, et on mesure l'amplitude du déplacement en fonction de la fréquence (mesure au sonomètre dont on suppose la réponse plate sur le domaine de fréquences étudié : voir notice?).

Tracer le diagramme de Bode en gain. Mesurer aussi l'impédance électrique.

1.2. Réversibilité

☞ **Manip** : taper sur la membrane et constater l'apparition d'une tension.

2. La génératrice à courant continu [108]

But : convertir de la puissance.

☞ **Manip** : mesure du rendement et de la caractéristique à vide, cf. MP22.

Transition : génératrice tachymétrique (fonctionne à vide pour ne pas prélever de puissance).

3. Capteurs de température [126]

Ce sont des transducteurs : convertissent la température en grandeur électrique. Cette partie recycle le MP04.

3.1. Étalonnage de la Pt100

Parler de fidélité et de justesse : discuter la mesure quatre fils, montrer l'importance du choix du courant de mesure.

3.2. Sensibilité

☞ **Manip** : étudier la réponse des différents capteurs et comparer les sensibilités.

3.3. Temps de réponse

☞ **Manip** : comparaison qualitative.

Conclusion

Choix du capteur en fonction de l'utilisation que l'on veut en faire.

♣ Remarque

Je trouve ce montage vraiment mauvais. En fait je ne l'aurais pris que dans le pire cas, où il se serait trouvé en face de mon montage impasse.

MP24 : Mesures électriques (mesure de fréquences exclue).

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

[124] Quaranta tome 3 *L'électronique*

[125] Quaranta tome 4 *L'électricité*

♣ Idées à illustrer

Aspect métrologie

Faire une mesure électrique, c'est se ramener à mesurer une tension

♣ Plan

Introduction

Problématique capteurs/transducteurs, d'où nécessité de mesures électriques.

1. Le voltmètre numérique

1.1. Principe du convertisseur analogique-numérique : CAN simple rampe

[47] p.270. ☞ **Manip** : construction et caractérisation du CAN. Vérifier la linéarité (retrouver la pente attendue en mesurant R et C). Ce n'est pas toujours très reproductible, je ne sais pas trop pourquoi.

1.2. Mesure de valeur efficace

[124] ☞ **Manip** : multiplicateur + passe-bas à l'entrée du CAN. Ajuster la fréquence de coupure. Redéfinir la valeur efficace.

1.3. Limitations : bande passante et impédance d'entrée

Orienter la discussion sur la justesse du voltmètre.

[à savoir] ☞ **Manip** : mesure de l'impédance d'entrée du voltmètre par tension moitié.

☞ **Manip** : bande passante : on envoie un signal d'amplitude connue (contrôlée à l'oscillo dont la bande passante est grande), et on trace le diagramme de Bode du voltmètre. Fréquence de coupure. Comparer à la notice.

1.4. Mesure de forts courants : pinces ampèremétriques

[à savoir] ☞ **Manip** : prendre les vieux modèles de pinces. Alim d'électrotechnique dans un rhéostat, plusieurs tours de fil. Mesure du facteur d'échelle (en faisant confiance à l'alim).

2. Étude de composants électroniques

2.1. Mesure de résistance

[125] ☞ **Manip** : mesure quatre fils avec un grand coax. Très bien discuter de l'intérêt de la mesure à quatre points. Pour créer un générateur de courant, ajouter un générateur de tension + une énorme résistance. Comparer à la mesure directe à l'ohmmètre (avec incertitudes).

2.2. Mesure de capacité

[à savoir] ☞ **Manip** : montage type capacimètre numérique (condensateur alimenté par une tension triangle, suivi d'un convertisseur courant-tension à AO), ou à défaut multivibrateur (ancien mesureur de capacité).

2.3. Mesure d'inductance

☞ **Manip** : mesure par détermination de la résonance d'un RLC série (oscillo. en mode XY).

♣ Remarque

Les expériences ne sont vraiment pas compliquées. Comme en plus c'est un montage type métrologie, le point central est la discussion des incertitudes.

MP25 : Amplification des signaux.

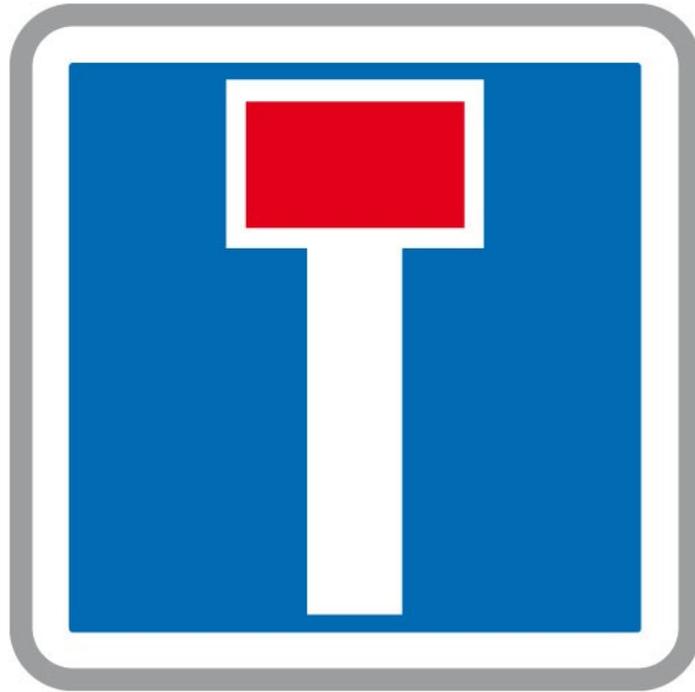


Fig. 25.1 – Schéma de principe d'un ambitieux circuit à transistor à présenter le jour de l'oral.

MP26 : Mise en forme, transport et détection de l'information.

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

[76] *Boucles à verrouillage de phase*, M. Girard

♣ Plan

Introduction

Pas très pratique de crier pour communiquer avec les australiens.

1. Étude du câble coaxial [à savoir]

Toutes les mesures doivent se faire en réflexion pour éviter les problèmes d'impédances.

‡ **Manip** : mesure de la vitesse de propagation. Mesure de l'impédance caractéristique. Remonter aux constantes réparties.

‡ **Manip** : mesure de l'atténuation (la réflexion est cruciale) $A = -20/L \log(V_s/V_e)$

‡ **Manip** : mesure de l'élargissement d'un pulse, en déduire un ODG du débit max.

2. Modulation de fréquence

[47] ‡ **Manip** : caractérisation d'un VCO. Réaliser la modulation. Calcul du taux de modulation. Afficher le spectre et estimer l'encombrement spectral.

3. Démodulation à l'aide d'une PLL

3.1. Étude de la PLL

[47, 76] Plage de verrouillage et de capture.

3.2. Démodulation

[47] Bien discuter les conditions auxquelles ça marche. Comparer spectre du signal modulant et spectre du signal modulé.

4. Transmission numérique d'information

[47] On module en fréquence par des créneaux, qui symbolisent des bits. Il faut filtrer en sortie de la PLL, et prendre des créneaux très basse fréquence (ou alors changer un peu le filtre de la PLL)

♣ Remarques

- ▷ Il faut commencer par mesurer les caractéristiques de la PLL **AVANT** de fabriquer le signal modulé.
- ▷ Commencer la préparation par la PLL
- ▷ Si on est joueur, on peut intervertir les paragraphes 1 et 2

MP27 : Acquisition, analyse et traitement des signaux.

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

♣ Idées à illustrer

Chaîne de traitement de données

♣ Plan

Introduction

Chaîne d'acquisition. On va modéliser les différents éléments. On ne traitera pas le fonctionnement du capteur.

1. Acquisition : de l'analogique au numérique

Idée : on a un capteur qui délivre un signal analogique. Ensuite, étape de numérisation.

1.1. Échantillonneur-bloqueur

[47] [à savoir] Utiliser le boîtier tout fait. Illustre le principe de l'échantillonnage. Ensuite il faut numériser la tension échantillonnée.

1.2. CAN simple rampe

[47] ☞ **Manip** : construction et caractérisation du CAN. Ce n'est pas toujours très reproductible, je ne sais pas trop pourquoi. Vérifier la linéarité (retrouver la pente attendue en mesurant R et C).

2. Analyse de Fourier d'un signal échantillonné [à savoir]

2.1. Critère de Shannon : importance de la fréquence d'échantillonnage

☞ **Manip** : on fixe la fréquence d'échantillonnage et la durée totale, et on envoie différents signaux à l'entrée.

Mise en évidence du critère de Shannon : temporel + TF. Solution : filtre anti-repliement en entrée (manip éventuellement).

2.2. Résolution spectrale : importance de la durée d'acquisition

☞ **Manip** : influence du temps d'acquisition sur la résolution spectrale.

3. Extraction d'un signal d'un environnement bruité [à savoir]

☞ **Manip** : lampe + hacheur, détection synchrone. Mesure des rapports signal/bruit avec et sans détection synchrone.

[47] p. 220. Bien expliquer le fonctionnement. Insister sur l'aspect traitement du signal : on le multiplie, on le filtre, etc.

Conclusion

Le capteur joue aussi un rôle essentiel (temps de réponse, sensibilité...). Adapter le capteur au phénomène physique et la chaîne au capteur.

MP28 : Mesures de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).

♣ Bibliographie

- [49] *Expériences de physique au CAPES*, R. Duffait
 [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
 [123] Quaranta tome I, *Mécanique*

♣ Plan

Introduction

Définir la fréquence = définie à partir de la période du césium.

1. Mesures par comptage

1.1. Le pendule simple

[123] ☞ **Manip** : mesure de période au chronomètre, repérage quand la vitesse est maximale. Mesurer 10 périodes pour diminuer l'incertitude. (Demander au technicien de) Faire la manip dix fois pour mener une étude statistique.

1.2. Le fréquencemètre

[47] ☞ **Manip** : avec le boîtier ENSL. Prendre l'oscillo 4 voies pour montrer tous les signaux. Mesurer un signal connu. Comparer au fréquencemètre commercial. Insister sur la précision (au hertz).
 [à savoir] ☞ **Manip** : mesure de la fréquence d'un diapason.

2. Mesures par comparaison

2.1. Battements acoustiques

[123] ☞ **Manip** : deux diapasons presque identiques, acquisition sur Synchronie. Mesurer la période des battements et de l'oscillation. En déduire l'écart de fréquences en en supposant un connu (p.ex. celui qu'on a mesuré juste avant).

2.2. Stroboscopie

[49] ☞ **Manip** : mesurer la fréquence de rotation d'un disque. Faire la mesure pour plusieurs multiples et fractions de la fréquence de rotation, puis fitter pour limiter l'incertitude.

3. Analyse de Fourier

3.1. Fréquences propres d'oscillateurs libres

[123] ☞ **Manip** : mesurer les fréquences propres des quatre oscillateurs couplés avec VidéoCom. Critères d'une bonne TF : temps d'acquisition (résolution), Shannon.

3.2. Analyse spectrale de signaux

☞ **Manip** : envoyer à Synchronie un signal créneau, un signal de diapason ...

Conclusion

Fréquences = facilement mesurables. On utilise souvent les mesures de fréquences pour mesurer numériquement d'autres grandeurs.

♣ Remarque

- ▷ C'est un montage de métrologie, pour lequel il faut beaucoup soigner la discussion sur les incertitudes, d'autant plus que les expériences sont simples.
- ▷ Ce montage a été présenté à l'oral, et s'est bien passé.

MP29 : Mesures de longueur.

♣ Bibliographie

[46] *Expériences d'optique à l'agrégation*, R. Duffait

[136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

La méthode est adaptée à la longueur qu'on doit mesurer

♣ Plan

Introduction

Mètre-étalon et définition actuelle du mètre. Première démarche : prendre un mètre-ruban pour mesurer. Problème : c'est pas toujours possible.

1. Mesure par temps de vol

♣ **Manip** : télémétrie acoustique. Mesure du temps de vol de pulses dans l'air et dans l'eau. Comparer à la mesure au mètre. Commentaire : on est limité par la mesure du temps, ce qu'on sait plutôt bien faire.

Intérêt : extension à des mesures sur de grandes distances (dauphins, télémétrie laser ...).

Transition : pour la lune, télémétrie laser. Pour étoiles lointaines : parallaxe.

2. Mesure par parallaxe

[à savoir] ♣ **Manip** : visée avec deux goniomètres. Dans l'idéal, prendre une référence vraiment loin (la halle Tony Garnier p.ex.) plutôt que le fond de la salle. Commentaire : le repérage de l'angle est limitant, ce qui dans notre cas donne une mesure vraiment pas très précise (facteur 2).

3. Mesure interférentielle

[46, 136] ♣ **Manip** : lame de verre dans le Michelson coin d'air en lumière blanche + laser. Faire défiler le moteur, compter les franges laser qui défilent, et arrêter le décompte lorsqu'on retrouve les franges de la lumière blanche. Ainsi la précision sur la mesure est typiquement la moitié de la longueur d'onde du laser. Si on se fie au vernier, on est limité par sa précision, et on ne gagne rien par rapport à une mesure au palmer plus rapide et plus simple. ♣ **Attention** : il faut avoir repéré (cherché sur internet à l'avance) le matériau dans lequel est fait la lame et son indice optique.

♣ **Manip** : comparaison à une mesure au palmer, intéressante pour la discussion sur la précision ... et pour être sûr de ne pas avoir fait de bêtise avec les facteurs 2. ♣ **Attention** : le palmer a parfois des problèmes de zéro.

4. Mesure par diffraction

4.1. Détermination de la taille caractéristique des spores de lycopodes

[46, 136] ♣ **Manip** : diffraction. A faire seulement si temps. Commenter : l'étude par diffraction est limitée à des objets de taille typique supérieure à la longueur d'onde.

5. Détermination du paramètre de maille du graphite

♣ **Manip** : mesure du paramètre de maille du graphite à l'aide du canon à électrons. Commenter le choix des électrons par rapport à un laser.

♣ Remarque

C'est un montage de métrologie, pour lequel il faut beaucoup soigner la discussion sur les incertitudes, d'autant plus que les expériences sont simples.

MP30 : Systèmes bouclés (oscillateurs exclus).

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

[76] *Boucles à verrouillage de phase*, M. Girard

♣ Idées à illustrer

Constance du produit gain \times bande

Contrôle du point de fonctionnement

Généralité des grandeurs qu'on peut asservir, unité du formalisme

♣ Plan

Introduction

Intérêt des systèmes asservis, oscillateurs exclus, systèmes logiques exclus

1. AO non inverseur

1.1. Caractérisation de l'AO

[47] 🗝 **Manip** : remonter au gain et à la fréquence de coupure. Calcul du produit gain \times bande, comparaison à la datasheet.

1.2. Etude en boucle fermée

🗝 **Manip** : diagramme de Bode de l'ampli non inverseur, à faire par la méthode de la réponse indicielle. Calcul du produit gain \times bande. Montrer que si on touche à la chaîne directe ça change rien, alors qu'à la chaîne de retour ça change tout !

2. Asservissement en position d'un moteur à courant continu [47]

🚫 **Attention** : il faut modifier le schéma du Duffait : AO3 à remplacer par l'ampli de puissance, attention à bien garder l'inverseur.

Bien détailler le rôle de chacun des blocs. Montrer toutes les tensions pertinentes pour bien expliquer comment ça marche. Utiliser une boîte AOIP pour faire varier V_e .

🗝 **Manip** : réponse indicielle. Montrer le temps de montée, le dépassement, stabilité. Au minimum on peut montrer le rôle du gain qualitativement.

3. Boucle à verrouillage de phase [47, 76]

3.1. Caractéristiques des différents éléments

En particulier insister sur le VCO, si on a le temps on peut regarder le passe-bas, sinon prendre la pulsation de coupure théorique.

3.2. Plages de verrouillage et de capture

🗝 **Manip** : les montrer. Si temps : application à la démodulation.

♣ Remarque

Le jury dit qu'il ne faut pas chercher à tout prix gain \times bande = constante. Je ne suis pas sûr de bien comprendre pourquoi, et donc je ne suis pas sûr de la pertinence de tout le montage.

MP31 : Instabilités et phénomènes non linéaires.

♣ Bibliographie

[48] *Étude expérimentale des oscillateurs mécaniques*, BUP 867, octobre 2004, R. Duffait

[90] *Électronique expérimentale*, M. Krob

[123] Quaranta tome I, *Mécanique*

♣ Idées à illustrer

Méthodes d'étude du non linéaire : c'est très compliqué, mais on peut en dire des choses assez simples.

Outils standards : Fourier, portrait de phase.

♣ Plan

Introduction

Linéarité = approximation en général. Que se passe-t-il quand on s'éloigne du domaine de réponse linéaire ?

1. Du linéaire au non linéaire : le pendule pesant [48, 123]

1.1. Étude aux petits angles

🔗 **Manip** : acquisition Synchronie. Mesure de la période propre. Isochronisme.

1.2. Étude aux grands angles

🔗 **Manip** : acquisition Synchronie. Perte d'isochronisme. Vérifier la formule de Borda. Conclure sur le domaine de validité de l'approximation linéaire. 🚫 **Attention** : il y a une erreur dans le code Synchronie donné dans le BUP.

Enrichissement spectral. Tracer le portrait de phase.

2. Instabilité non linéaire : oscillateur de Van der Pol [90]

2.1. Élément non linéaire

🔗 **Manip** : caractérisation, mesure des coefficients α et β .

2.2. Cycle limite

🔗 **Manip** : portrait de phase, qui possède un attracteur = point fixe ou cycle limite suivant R .

2.3. Bifurcation

🔗 **Manip** : tracer l'amplitude en fonction de la résistance. Si temps : ralentissement critique de la naissance des oscillations.

3. Forçage et transition vers le chaos [90]

🔗 **Manip** : double-puits en modifiant le Van der Pol.

Portrait de phase : deux points fixes.

Montrer le chaos. Préciser que si les trajectoires se coupent, c'est que l'on regarde la projection à 2d d'un espace de phase 3d (à cause du forçage temporel qui donne la troisième dimension).

Conclusion

Outils d'étude = analyse fréquentielle, portrait de phase pour dire des choses même quand on ne sait pas résoudre.

MP32 : Ondes : propagation et conditions aux limites.

♣ Bibliographie

[70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing

[84] *Hydrodynamique physique*, E. Guyon : *a priori* la nouvelle édition (verte) est plus complète.

[129] Cap Prépa PC ou PSI, V. Renvoizé

♣ Idées à illustrer

Généralité de la physique des ondes

Dispersion

Rôle des CL, distinction CL orthogonales et CL transverses

♣ Plan

Introduction

🔗 **Manip** : avec la corde d'escalade : visualiser la propagation.

1. Propagation libre

1.1. Propagation non-dispersive : exemple des ondes acoustiques

🔗 **Manip** : mesure de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans l'air. Émetteur + récepteur ultrasons à déplacer. Montrer qu'il y a pas trop de déformation des pulses, signe que c'est non dispersif. Attention à l'erreur systématique due sans doute au grand temps de réponse de l'émetteur ultrasonore.

Remarque : cette expérience est en fait moyennement convaincante, car on ne montre pas vraiment que la propagation est non-dispersive. Attendre la partie corde de Melde pour le discuter ?

1.2. Propagation dispersive : exemple des ondes gravito-capillaires

[84] 🔗 **Manip** : cuve à ondes de surface. Déterminer le grandissement du système de projection de la cuve, puis la relation de dispersion. Remonter à une valeur de tension de surface.

2. Réflexion et transmission, impédance

2.1. Notion d'impédance : mesure de l'impédance acoustique du verre

🔗 **Manip** : utiliser la cloche à vide sans faire le vide. Avec un sonomètre, mesurer l'intensité sans et avec la cloche.

[70] Remonter au coeff de transmission en énergie, puis à l'impédance du verre. Comparaison avec la valeur donnée dans le Cap Prépa (exercice corrigé p. 603).

2.2. Impédance caractéristique : exemple du câble coaxial

🔗 **Manip** : mesure de l'impédance caractéristique. Comparer à la valeur écrite sur le câble. Notion d'adaptation d'impédance, intérêt.

3. Confinement dans la direction de propagation et ondes stationnaires

3.1. Ondes stationnaires et résonances

🔗 **Manip** : montrer les ondes stationnaires sur la corde de Melde. Mesure des fréquences de résonance au stroboscope, tracé en fonction du numéro du mode.

Remonter à la vitesse et comparer avec la valeur obtenue par mesure indépendante de la tension et de la masse linéique. Commenter le caractère non-dispersif de la propagation.

3.2. Variété des conditions aux limites et rapport d'ondes stationnaires

🔗 **Manip** : banc hyperfréquences. Mesurer le rapport d'ondes stationnaires pour différentes conditions de sortie, conclure que la forme des ondes stationnaires dépend directement de la condition aux limites. Revenir sur l'adaptation d'impédance.

4. Confinement transverse et ondes guidées

🔗 **Manip** : relation de dispersion dans le banc hyperfréquences. Remonter aux dimensions du guide. Comparer à ce que donne la notice, opposer les dispersions inter et intramodale.

Conclusion

Généralité des phénomènes ondulatoires (même type de phénomènes quelles que soient les ondes). Utilité dans la transmission d'information.

♣ Remarque

Câble coaxial : on ne mesure que le module de l'impédance. L'impédance est réelle seulement si le câble est sans pertes.

MP33 : Ondes acoustiques.

♣ Bibliographie

[70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing

[129] Cap Prépa PC ou PSI, V. Renvoizé

♣ Idées à illustrer

Ce sont des ondes

Elles ont besoin d'un support matériel pour se propager, solide, liquide ou gaz

♣ Plan

Introduction

Je parle, vous m'entendez

1. Caractère ondulatoire

1.1. Mise en évidence de la propagation

🔗 **Manip** : clap dans les mains, à faire proprement. Remonter à un ODG de c . Trancher sur l'hypothèse isotherme.

1.2. Interférences

🔗 **Manip** : deux émetteur ultrasonores mis côte à côte, on utilise un récepteur que l'on place sur une plaque translattable avec un moteur (utiliser celui du banc hyperfréquences). Acquérir sous Synchronie. On voit une jolie figure d'interférences. Si on s'est mis trop près, il se peut que le récepteur sorte du champ d'interférence.

1.3. Battements acoustiques

[123] 🔗 **Manip** : deux diapasons presque identiques, acquisition sur Synchronie. Mesurer la période des battements et de l'oscillation. Faire la TF pour trouver les deux fréquences, et vérifier les formules des battements.

2. Dépendance de c en température

🔗 **Manip** : tube de Kundt, remonter à γ . Si la manip déconne (ce qui ne manquera pas d'arriver), appeler Antoine.

Interprétation pas simple, beaucoup de choses entrent en jeu. Mentionner qu'on a des ondes stationnaires, et les CL peuvent poser problème. Par contre pas de pb de propagation guidée si on suppose l'onde plane, transverse, et le fluide parfait (en fait on ne propage que le mode $n = 1$, qui a la même relation de dispersion que dans le vide). Idée : utiliser des impulsions plutôt que des ondes stationnaires? (c'est ce qui est fait à Cachan)

3. Mesure de la vitesse du son dans le Dural

🔗 **Manip** : utiliser la cuve à ondes acoustiques. Montrer les ondes p et s . 🚫 **Attention** : il peut y avoir des problèmes de réflexion multiples entre l'émetteur et le bloc.

4. Mesure de l'impédance acoustique du verre

🔗 **Manip** : utiliser la cloche à vide sans faire le vide. Avec un sonomètre, mesurer l'intensité sans et avec la cloche.

[70] Remonter au coeff de transmission en énergie, puis à l'impédance du verre. Comparaison avec la valeur donnée dans le Cap Prépa (exercice corrigé p. 603).

Conclusion

Ouvrir aux applications médicales

♣ Remarque

J'ai présenté ce montage en oral blanc. Il était un peu court, suite à quoi j'ai ajouté l'expérience des battements acoustiques.

MP34 : Résonance.

♣ Bibliographie

- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
 [116] Cap Prépa sup, J. Pérez, ou votre livre de sup préféré
 [132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz, ou votre livre de spé préféré

♣ Idées à illustrer

Généralité à tous les domaines de la physique
 Notion de facteur de qualité
 Un système a autant de modes résonants que de degrés de liberté

♣ Plan

Introduction

Définition de la résonance. Montrer qualitativement avec masse + ressort et interpréter. On va étudier l'équivalent électrique (intérêt : on peut changer facilement les constituants).

1. Résonance électrique : RLC série [47, 116]

Mettre un suiveur derrière le GBF. Une seule résonance car un seul ddl.

1.1. Résonance en intensité

♣ **Manip** : mesurer la fréquence de résonance en mode XY (méthode de Lissajous), on compare à la valeur théorique. Mesure pour différentes valeurs de C et fit.

♣ **Manip** : Réponse indicielle sur Synchronie. Facteur de qualité à mesurer comme $\Delta f_0/f_0$ (acuité de la résonance). Faire le lien entre facteur de qualité et temps d'amortissement du transitoire.

1.2. Résonance en tension

♣ **Manip** : réponse indicielle sur Synchronie. Elle n'existe pas tout le temps. Fitter la fréquence de résonance en fonction de R .

2. Résonance d'oscillateurs mécanique couplés

♣ **Manip** : quatre oscillateurs couplés par ressort. Faire une TF pour avoir les fréquences propres, puis utiliser le moteur pour avoir des oscillations forcées. On a autant de fréquences de résonances que de modes d'oscillations propres que de degrés de liberté.

3. Corde de Melde [132]

♣ **Manip** : mesure des fréquences de résonance au stroboscope, tracé en fonction du numéro du mode. On a une infinité de modes résonants car une infinité de degrés de liberté. Remonter à la vitesse et comparer avec la valeur obtenue par mesure indépendante de la tension et de la masse linéique.

4. Cavité Fabry-Pérot

♣ **Manip** : cavité confocale Melles-Griot pour voir les modes d'un laser He-Ne. Faire chauffer le laser longtemps à l'avance. Expliquer l'analogie avec la corde de Melde.

Conclusion

Phénomène à craindre, et parfois très utile en métrologie et ailleurs.

♣ Remarque

Montrer la résonance d'un cristal de quartz serait une très bonne idée.

MP35 : Oscillateurs auto-entretenus

♣ Bibliographie

[47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait

[90] *Électronique expérimentale*, M. Krob

♣ Idées à illustrer

Auto-entretenu : nécessite un apport d'énergie (continu) depuis l'extérieur

On prédit la fréquence mais pas l'amplitude qui est gouvernée par les effets non linéaires.

♣ Plan

Introduction

Définition (système qui génère un signal périodique en l'absence d'excitation périodique).

1. Oscillateur quasi-sinusoidal : oscillateur à pont de Wien [90]

1.1. Fonction de transfert en boucle ouverte

♻ **Manip** : diagramme de Bode du filtre en boucle ouverte. Pulsation propre et facteur de qualité.

1.2. Démarrage des oscillations

♻ **Manip** : montrer la naissance des oscillations, leur pulsation. Tracer le diagramme de Nyquist sur Régressi. Relier à la condition de Barkausen.

1.3. Analyse du signal de sortie

♻ **Manip** : Mesurer le taux de distorsion harmonique. Coefficient de stabilité en fréquence.

Transition : si on augmente la résistance, déformation car l'AO fonctionne de plus en plus longtemps en régime non linéaire.

2. Oscillateur à relaxation : multivibrateur astable [47]

♻ **Manip** : montrer les caractéristiques des deux éléments : diagramme XY pour le comparateur à hystérésis, de Bode pour l'intégrateur.

♻ **Manip** : mesurer la période, à tracer en fonction de R . Il y a un écart pour R faible : en réalité, on a $R_{\text{eff}} = R + R_{\text{AO}}$, en déduire R_{AO} .

Application à la génération de signaux : mettre les diodes pour modifier le rapport cyclique.

3. Oscillateur à portes logiques

[47] p. 200. ♻ **Manip** : oscillateur à portes NAND CMOS, utiliser le boîtier ENSL pour les portes.

Conclusion

Génération de signaux et bases de temps (oscilloscopes par exemple).

♣ Remarque

Montrer le filtrage par un oscillateur à quartz serait une très bonne idée.

MP36 : Couplage des oscillateurs.

♣ Bibliographie

- [48] *Étude expérimentale des oscillateurs mécaniques*, BUP 867, octobre 2004, R. Duffait
 [124] Quaranta tome 3 *L'électronique*
 [123] Quaranta tome I, *Mécanique*

♣ Idées à illustrer

Notion de modes propres (autant que d'oscillateurs)
 Efficacité du couplage maximale lorsque les deux oscillateurs sont identiques,

♣ Plan

Introduction

Couplage = transfert d'énergie. Autant de modes propres que d'oscillateurs.

1. Couplage de deux oscillateurs : pendules pesants couplés par un fil de torsion

[123] à adapter. En préparation : équilibrer les pendules, mesure de la période propre (sur Synchronie), en déduire le moment d'inertie.

1.1. Constante de couplage

☞ **Manip** : un pendule fixé, mesurer la période (Synchronie), en déduire la constante de couplage.

1.2. Efficacité du couplage

☞ **Manip** : changer la masse du second pendule et montrer qualitativement que le couplage est maximal à $m_1 = m_2$.

1.3. Mise en évidence des modes propres

☞ **Manip** : montrer qualitativement les deux modes propres. Acquisition des battements sous Synchronie. TF et mesure des pulsations propres.

1.4. Étude énergétique

Ne pas oublier l'énergie de couplage. Attention aux unités, ça merde à tous les coups.

2. Influence de la constante de couplage : couplage capacitif de deux oscillateurs LC [124]

2.1. Ajustement des oscillateurs

☞ **Manip** : ajuster les 2 oscillateurs (mode XY), pour avoir un couplage optimal.

2.2. Modes propres

☞ **Manip** : montrer le mode symétrique (si temps). Acquisition des battements : mesure des pulsations propres en fonction de la capacité de couplage.

3. Chaîne de pendules couplés [48]

☞ **Manip** : utiliser les quatre pendules couplés par ressorts et Vidéocom.

3.1. Modes propres

☞ **Manip** : TF en excitant le premier pendule.

3.2. Oscillations forcées et résonances

☞ **Manip** : visualiser les modes propres en oscillations forcées avec le moteur. Il y a résonance lorsque la fréquence d'excitation est égale à la fréquence d'un des modes propres.

3.3. Relation de dispersion

☞ **Manip** : bloquer 1, 2 oscillateurs.

Conclusion

Vers la propagation d'ondes.

♣ Remarque

J'ai présenté ce montage le jour de l'oral. Seule différence, les quatre oscillateurs masse-ressort n'étaient pas les mêmes qu'à Lyon et je n'ai pas pu réaliser la manip d'oscillations forcées. Je l'ai remplacée par des oscillations forcées sur les oscillateurs RLC, l'expérience a marché en préparation ... mais pas devant le jury. Les questions ont essentiellement porté sur le traitement des incertitudes que j'avais mal géré. Le jury a trouvé les expériences convaincantes, et couvrant bien tous les aspects du sujet.

MP37 : Filtrage des signaux.

♣ Bibliographie

- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
- [46] *Expériences d'optique*, R. Duffait
- [123] Quaranta tome I, *Mécanique*
- [136] *Optique expérimentale*, Sextant

♣ Idées à illustrer

Généralité du filtrage
Rôle de la TF

♣ Plan

Introduction

Principe du filtrage et généralité

1. Filtrage électronique

1.1. Filtrage passe-bas

- 🔗 **Manip** : filtre RC. Étude qualitative avec un créneau. Diagramme de Bode point par point.
- 🔗 **Manip** : application au filtrage du bruit, avec un sommateur à AO.

1.2. Filtrage passe-bande

- 🔗 **Manip** : utilisation du filtre MF10. Diagramme de Bode en réponse impulsionnelle. Fréquence centrale et bande passante.
- 🔗 **Manip** : application à la séparation de deux sinusoïdes.

2. Filtrage mécanique

- 🔗 **Manip** : oscillateur, suivi par fil dans l'éprouvette. Etude qualitative : BF, résonance, HF. Diagramme de Bode en réponse indicielle. Fréquence centrale, bande passante.

3. Filtrage de fréquences spatiales en optique

- 🔗 **Manip** : expérience d'Abbe. Détramage d'une photo.

Conclusion

Détection synchrone

♣ Remarque

Nous avons préparé et présenté ce montage devant la classe pendant l'année. Il est d'une bonne longueur, et les commentaires des correcteurs étaient plutôt positifs.

MP38 : Régimes transitoires.

♣ Bibliographie

- [47] *Expériences d'électronique*, R. Duffait
 [116] Cap Prépa sup, J. Pérez, ou votre livre de sup préféré
 [126] Quaranta tome 2 *Thermodynamique* : prendre l'édition la plus récente

♣ Idées à illustrer

Transitoire = outil très puissant pour caractériser un système linéaire
 Néanmoins il contraint l'utilisation qu'on peut faire de ce système

♣ Plan

Introduction

Transitoire = réponse du système à un changement des contraintes extérieures, passage d'un régime permanent à un autre.

1. Différents types de transitoires

[116] ✂ **Manip** : étude du circuit RLC alimenté par un créneau BF et boîte de résistance. Général pour un système linéaire d'ordre 2 (en méca il y a ça aussi). La résistance interne du GBF pose pb, mettre un suiveur.

1.1. Régime pseudo-périodique

Objectif : mesurer la pseudo-période pour remonter à T_0 , période propre. On utilise différentes R pour faire varier Q et on fitte.

Commentaire : Q correspond à peu près au nombre d'oscillations amorties, temps d'amortissement augmente avec Q .

1.2. Régimes critique et apériodique

Régime critique = plus de dépassement. On trouve la résistance critique, on peut alors remonter à L et C .

Régime apériodique : mesure du temps d'amortissement en fct de Q . (qualitatif)

2. Le régime transitoire : un outil de caractérisation du système

Transition : l'étude du transitoire nous a permis de trouver des caractéristiques du circuit. On peut en fait faire mieux et tout trouver.

2.1. Réponse indicielle de l'asservissement en position

[47] ✂ **Manip** : pour différentes valeurs de R (donc de Q), superposer les courbes sur Synchronie. Essentiel : parler de la linéarité. A très bien discuter.

2.2. Diffusion thermique dans une barre de cuivre

[126] ✂ **Manip** : barre de cuivre en choc thermique, cf. bonus MP17. Remonter à la conductivité thermique.

3. Les limitations liées au transitoire

3.1. Le dépassement

[47] Mesure du dépassement de l'asservissement de position. Fit de la loi avec Q . → Compromis à trouver entre temps de réponse et dépassement.

3.2. Temps de réponse des capteurs

Mesure du temps de réponse d'une photodiode et d'une photorésistance, à partir d'un signal de stroboscope. Discuter le lien entre temps de réponse du capteur et son utilisation.

Commentaire : ces pb de tps de réponse sont à la base de tout ce qu'on fait en optique.

MP39 : Phénomènes de transport.

♣ Bibliographie

[70] *Ondes mécaniques et diffusion*, C. Garing

[126] Quaranta tome 2 *Thermodynamique* : prendre l'édition la plus récente

♣ Idées à illustrer

Plusieurs modes de transport, plusieurs choses à transporter

♣ Plan

Introduction

[126] Définition du transport, diversité des phénomènes

1. Convection

☞ **Manip** : qualitative dans le tube fait pour avec sciure de bois.

2. Diffusion du glycérol dans l'eau

☞ **Manip** : diffusion du glycérol dans l'eau. ⚠ **Attention** : principe de la manip décrit dans [126]. Mais il faut prendre le résultat de [126], en le modifiant avec le $\vec{grad} n$ de [70], sans oublier la réfraction à la sortie de la cuve. Penser à éclairer de biais avec la lentille cylindrique.

On remonte à D , mais il est pas tabulé : commenter l'ODG, et surtout la loi en \sqrt{t} qui est caractéristique d'un phénomène diffusif.

3. Diffusion thermique du cuivre

[126] ☞ **Manip** : barre de cuivre en choc thermique, cf. bonus MP17. Remonter à la conductivité thermique.

4. Conduction électrique du cuivre

☞ **Manip** : mesure quatre fils de la conductivité électrique du cuivre. Utiliser la bobine calibrée qui va dans l'eau. Tracer U en fct de I et faire un fit pour arriver à γ . Faire la manip pour plusieurs températures avec un bain thermostaté. Tester la loi de Wiedmann-Franz.

5. Transport par rayonnement

☞ **Manip** : mesurer la puissance rayonnée par l'ampoule de tungstène avec la thermopile, mesurer la température du filament avec le pyromètre, essayer de remonter à la loi de Stefan. C'est la seule méthode qui marche à peu près, l'utilisation de la formule magique du Quaranta foire et la mesure de la puissance électrique fournie à l'ampoule aussi.

Conclusion

Effets croisés (Seebeck, Peltier)

MP40 : Phénomènes dissipatifs.

♣ Bibliographie

- [22] H-Prépa *Électronique PSI-PSI**, J.M. Brébec : prendre la vieille édition (verte) pour avoir les pertes séparées
 [126] Quaranta tome II, *Thermodynamique* : prendre l'édition la plus récente.
 [132] Dunod PC-PC*, M.N. Sanz

♣ Idées à illustrer

Phénomène dissipatif = conversion d'énergie utile en énergie thermique
 Cette énergie utile peut être de plusieurs sortes

♣ Plan

Introduction

Conservation et conversion de l'énergie, définir la dissipation.

1. Effet Joule

[126] ☞ **Manip** : calorimétrie. Discussion : temps de réponse du thermomètre, éviter de mesurer dT/dt mais plutôt $(T_{\text{fin}} - T_{\text{init}})/\Delta t$ pour différentes valeurs de Δt (ça donne une droite plutôt qu'une mesure unique).

2. Frottements solides

[132] pour les aspects théoriques. ☞ **Manip** : stick-slip avec le dispositif (bricolage) ENSL. Acquisition sur VidéoCom. Remonter aux deux coefficients de frottement. Faire soi-même un bilan énergétique pour montrer qu'il y a de la dissipation.

3. Pertes dans un transformateur [22]

3.1. Caractéristique en charge

☞ **Manip** : mesure directe de rendement, se placer au régime nominal. Constater les pertes, dire qu'on va s'intéresser séparément à chaque type de pertes par la méthode des pertes séparées, d'où les deux sous-parties suivantes.

3.2. Pertes fer

☞ **Manip** : courbe U_2 en fct de U_1 , lien avec le transfo parfait. Courbe P_{fer} en fct de U_1^2 .

3.3. Pertes cuivre

Courbe I_1 en fonction de I_2 et P_1 en fct de I_2^2 .

♣ Remarque

Ce montage mériterait d'être largement retravaillé !

Bibliographie

- [1] T. ALHALEL : *Dynamique de l'atmosphère terrestre : mécanique élémentaire appliquée à un problème complexe*. BUP 939, Décembre 2011.
- [2] B. ANDREOTTI, Y. FORTERRE et O. POULIQUEN : *Les milieux granulaires : entre fluide et solide*. CNRS éditions, 2011.
- [3] N. ASHCROFT et D. MERMIN : *Physique des solides*. EDP Sciences, 2002.
- [4] P. W. ATKINS et J. de PAULA : *Chimie physique*. de Boeck, 9e éd., 2008.
- [5] G. AVOND : *Oxydation des hydrocarbures : dégradation-combustion-sécurité*. BUP 700, Février 1988.
- [6] H. BAROUX : *Acides aminés et liaison peptidique*. BUP 625, Juin 1980.
- [7] J.-L. BASDEVANT et J. DALIBARD : *Problèmes quantiques*. École Polytechnique, 2004.
- [8] J.-L. BASDEVANT, J. DALIBARD et M. JOFFRE : *Mécanique quantique*. École Polytechnique, 2002.
- [9] T. BECHERRAWY : *Optique géométrique*. de Boeck, 2005.
- [10] J.-J. BENAYOUN et R. MAYNARD : *Physique de la matière condensée*. Interéditions, 1991.
- [11] N. BERLEMONT : *Analyse partielle de l'eau de Contrexéville*. BUP 619, Décembre 1979.
- [12] M. BERTIN, J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Optique géométrique*. Dunod, 1978.
- [13] M. BERTIN, J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Thermodynamique*. Dunod, 1982.
- [14] M. BERTIN, J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Mécanique I : mécanique de systèmes de points et notions de relativité*. Dunod, 1985.
- [15] M. BLANCHARD, B. FOSSET, F. GUYOT, L. JULLIEN et S. PALACIN : *Chimie organique expérimentale*. Hermann, 1987.
- [16] J. BOUTIGNY : *Mécanique tome 2 : Mathématiques spéciales*. Vuibert, 1984.
- [17] P. BRASSELET : *Mécanique MPSI-PCSI : 1ère année*. Presses universitaires des France, 2000.
- [18] J.-M. BRÉBEC, J.-N. BRIFFAUT, P. DENÈVE, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL et C. ORSINI : *Thermodynamique 1ère année PCSI-MPSI-PTSI*. H-Prépa. Hachette.
- [19] J.-M. BRÉBEC, J.-N. BRIFFAUT, P. DENÈVE, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL et C. ORSINI : *Thermodynamique 2ème année MP*. H-Prépa. Hachette.
- [20] J.-M. BRÉBEC, J.-N. BRIFFAUT, P. DENÈVE, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL et C. ORSINI : *Thermodynamique 2ème année PC-PSI-PT*. H-Prépa. Hachette.
- [21] J.-M. BRÉBEC, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL, C. ORSINI et J.-M. VANHAECKE : *Électromagnétisme MP-PSI-PC-PT*. H-Prépa. Hachette.
- [22] J.-M. BRÉBEC, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL, C. ORSINI et J.-M. VANHAECKE : *Électronique, 2ème année PSI-PSI**. H-Prépa. Hachette.
- [23] J.-M. BRÉBEC, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL, C. ORSINI et J.-M. VANHAECKE : *Ondes 2e année MP-PSI-PC-PT*. H-Prépa. Hachette.
- [24] J.-M. BRÉBEC, T. DESMARAIS, A. FAVIER, M. MÉNÉTRIER, B. NOËL, R. NOËL, C. ORSINI et J.-M. VANHAECKE : *Optique ondulatoire MP-PSI-PC-PT*. H-Prépa. Hachette.
- [25] P. BRENDERS, G. BUFFARD, L. DOUCHET, M. SAUZEIX et S. TISSERANT : *Électronique PSI*. Les nouveaux Précis Bréal. Bréal.
- [26] P. BRENDERS, L. DOUCHET et M. SAUZEIX : *Électrotechnique PSI*. Les nouveaux Précis Bréal. Bréal.
- [27] D. CACHAU HEREILLAT : *Des expériences de la famille acide/base*. de Boeck, 2009.
- [28] D. CACHAU HEREILLAT : *Des expériences de la famille redox*. de Boeck, 2011.

- [29] B. CAGNAC, L. TCHANG-BRILLET et J.-C. PEBAY-PÉROULA : *Physique atomique - Atomes et rayonnement : interactions électromagnétiques*. Dunod, 2ème éd., 2005.
- [30] J.-R. CHAMPEAU, R. CARPENTIER et I. LORGERÉ : *Ondes lumineuses : propagation, optique de Fourier, cohérence*. de Boeck, 2009.
- [31] N. CHOIMET : *Thermodynamique PC-PSI*. Les nouveaux Précis Bréal. Bréal.
- [32] C. CHÈZE, M. DELÈGUE et F. BRONSARD : *Mécanique 2e année MP-PC-PSI-PT-ATS*. Ellipses, 2008.
- [33] C. COHEN-TANNOUJJI, B. DIU et F. LALOË : *Mécanique quantique, tome I*. Hermann, 1998.
- [34] C. COULON et S. MOREAU : *Thermodynamique et physique statistique*. Dunod, 2000.
- [35] A. CUNNINGTON *et al.* : *Chimie Terminales C-D-E*. Hatier, 1987.
- [36] D. DANGOISSE, D. HENNEQUIN et V. ZEHNLE : *Les lasers*. Dunod, 2009.
- [37] F. DAUMARIE et P. GRIESMAR : *Florilège de chimie pratique*. Hermann, 1998.
- [38] P.-G. de GENNES, F. BROCHARD-WYART et D. QUÉRÉ : *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin, 2005.
- [39] J.-L. DELCROIX et A. BERS : *Physique des plasmas, tome I*. EDP Sciences, 1994.
- [40] P. DELVALLE : *Danger : monoxyde de carbone*. BUP 663, Février 1984.
- [41] L. DETTWILLER : *Instruments d'optique : étude théorique, expérimentale et pratique*. Ellipses, 1997.
- [42] B. DIU, C. GUTHMANN, D. LEDERER et B. ROULET : *Éléments de physique statistique*. Hermann, 1989.
- [43] B. DIU, C. GUTHMANN, D. LEDERER et B. ROULET : *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [44] E. du Trémolet de LACHEISSERIE : *Magnétisme – Tome 1 : Fondements*. EDP Sciences, 1999.
- [45] E. du Trémolet de LACHEISSERIE : *Magnétisme – Tome 2 : Applications*. EDP Sciences, 1999.
- [46] R. DUFFAIT : *Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1997.
- [47] R. DUFFAIT : *Expériences d'électronique à l'agrégation de sciences physiques*. Bréal, 1999.
- [48] R. DUFFAIT : *Étude expérimentale des oscillateurs mécaniques*. BUP 867, Octobre 2004.
- [49] R. DUFFAIT : *Expériences de physique au CAPES de sciences physique*. Bréal, 2008.
- [50] A. DURUPHTY, V. BESNARD, P. BRAMAND, J.-P. DURANDEAU, P. FAYE, R. MARTEGOUTES, R. SAHUN et G. THOMASSIER : *Physique Terminale S*. Hachette, 2002. Programme 2002.
- [51] A. DURUPHTY, A. CASALOT, D. CAUCHY, C. FOURES, A. JAUBERT, C. MESNIL et T. ZOBIRI : *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**. H-Prépa. Hachette.
- [52] A. DURUPHTY, D. CAUCHY, O. DURUPHTY, J. ESTIENNE, M. GIACINO, C. FOURES et A. JAUBERT : *Chimie PC-PC**. H-Prépa. Hachette.
- [53] A. DURUPHTY, T. DULAUANS *et al.* : *Physique Chimie Première S – Nouveau programme*. Hachette, 2011.
- [54] A. DURUPHTY, J. ESTIENNE, M. GIACINO, A. JAUBERT et C. MESNIL : *Chimie PCSI 1ère période*. H-Prépa. Hachette.
- [55] A. DURUPHTY, J. ESTIENNE, M. GIACINO, A. JAUBERT et C. MESNIL : *Chimie PCSI 2ème période*. H-Prépa. Hachette.
- [56] A. DURUPHTY *et al.* : *Chimie Première S*. Hachette, 2001.
- [57] A. DURUPHTY *et al.* : *Chimie Terminale S*. Hachette, 2002.
- [58] A. DURUPHTY *et al.* : *Physique Chimie Terminale S spécialité*. Hachette, 2002.
- [59] O. DURUPHTY, A. DURUPHTY et M. DUBUSC : *Chromatographie sur papier et électrophorèse d'acides aminés*. BUP 714, Mai 1989.
- [60] J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Mécanique II, 2ème année MP-PC*. Dunod, 1997.
- [61] J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Thermodynamique, 1ère et 2ème année*. Dunod, 1997.

- [62] J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Mécanique I, 1ère année MPSI-PCSI*. Dunod, 1998.
- [63] J.-P. FAROUX et J. RENAULT : *Mécanique des fluides et ondes mécaniques*. Dunod, 1999.
- [64] R. FEYNMAN : *Le cours de physique de Feynman : électromagnétisme I*. Dunod, 1999.
- [65] R. FEYNMAN : *Le cours de physique de Feynman : mécanique quantique*. Dunod, 1999.
- [66] R. FEYNMAN : *Les astuces de Feynman*. Pearson Education, 2006.
- [67] R. FOURNIÉ et J.-C. MALLET : *Chimie des matériaux inorganiques PC-PC**. Dunod, 1997.
- [68] C. GARING : *Ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs*. Ellipses, 1998.
- [69] C. GARING : *Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques*. Ellipses, 1998.
- [70] C. GARING : *Ondes mécaniques et diffusion*. Ellipses, 1998.
- [71] C. GARING : *Magnétisme : statique, induction et milieux*. Ellipses, 1999.
- [72] C. GARING : *Les 1001 questions de la physique en prépa 2ème année PC-PC**. Ellipses, 2006.
- [73] C. GARING et A. LHOPITAL : *Les 1001 questions de la physique en prépa 1ère année*. Ellipses, 2007.
- [74] M. GERL : *Système à deux états*. BUP 574, Mai 1975.
- [75] H. GIÉ et J.-P. SARMANT : *Électromagnétisme 2ème année*. Tec&Doc, 1996.
- [76] M. GIRARD et G. CABRISY : *Boucles à verrouillage de phase*. ???, 1991.
- [77] Y. GRANJON : *Automatique : systèmes linéaires, non linéaires, à temps continu, à temps discret, représentation d'état*. Dunod, 2e éd., 2010.
- [78] P. GRÉCIAS : *Chimie PC-PC**. Référence prépa. Tec&Doc.
- [79] P. GRÉCIAS : *Chimie PCSI*. Référence prépa. Tec&Doc.
- [80] P. GRÉCIAS : *Chimie organique – Cours et exercices corrigés*. Tec&Doc, 3e éd., 2004.
- [81] P. GRÉCIAS et J.-P. MIGEON : *Physique PCSI*. Référence prépa. Tec&Doc, 2009.
- [82] P. GRÉCIAS et V. TEJEDOR : *Chimie PSI-PSI**. Méthodes et annales. Tec&Doc.
- [83] A. GUINIER : *Propriétés électroniques des solides*. BUP 550, Décembre 1972.
- [84] E. GUYON, J.-P. HULIN et L. PETIT : *Hydrodynamique physique*. EDP Sciences, 2001. Attention, les deux éditions (rouge et verte) n'ont pas exactement le même contenu. Dans le doute privilégier la plus récente.
- [85] D. HALLIDAY, R. RESNICK et J. WALKER : *Physique 3 – Ondes, optique et physique moderne*. Dunod, 2003.
- [86] S. HOUARD : *Optique : une approche expérimentale et pratique*. de Boeck, 2011.
- [87] J.-B. JEAN *et al.* : *Chimie Première S*. Sirius. Nathan, 2005.
- [88] J.-B. JEAN *et al.* : *Chimie Terminale S*. Sirius. Nathan, 2005.
- [89] J. JÉZÉQUEL : *Étude de l'équilibre entre $\text{NO}_2(g)$ et $\text{N}_2\text{O}_4(g)$* . BUP 879, Décembre 2005.
- [90] M. KROB : *Électronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [91] B. LAHAYE : *Propagation des ondes : vitesse de phase, vitesse de groupe*. BUP 649, Décembre 1982.
- [92] B. LATOUR : *Leçons de thermodynamique*. Ellipses, 1997.
- [93] J.-F. LE MARÉCHAL et R. BARBE : *La chimie expérimentale – Tome 2 : chimie organique et minérale*. Dunod, 2006.
- [94] J.-F. LE MARÉCHAL *et al.* : *Chimie Terminale S*. Microméga. Hachette, 2002.
- [95] J.-F. LE MARÉCHAL *et al.* : *Physique Chimie Terminale S spécialité*. Microméga. Hachette, 2002.
- [96] J.-F. LE MARÉCHAL *et al.* : *Physique Chimie Première S – Nouveau programme*. Microméga. Hachette, 2011.

- [97] J.-F. LE MARÉCHAL et B. NOWAK-LECLERQ : *La chimie expérimentale – Tome 1 : chimie générale*. Dunod, 2004.
- [98] B. LEROY : *Le microscope à effet tunnel*. BUP 699, Décembre 1987.
- [99] J.-M. LEVY-LEBLOND et F. BALIBAR : *Quantique – Rudiments*. Dunod, 2007.
- [100] R. MAHÉ, D. DEVILLIERS et E. MAHÉ : *Expériences portant sur la notion d'indicateur coloré*. BUP 801, Février 1998.
- [101] F. MARTIN : *Le réfrigérateur*. BUP 832, Mars 2001.
- [102] C. MATTA : *Effet tunnel : quelques applications*. BUP 734, Mai 1991.
- [103] J. MESPLÈDE : *Chimie PCSI*. Les nouveaux précis Bréal. Bréal.
- [104] J. MESPLÈDE et al. : *Chimie Terminale S*. Bréal, 2002.
- [105] J. MESPLÈDE et J. RANDON : *100 manipulations de chimie générale et analytique*. Bréal, 2004.
- [106] R. MEYER, C. DENIER et G. BIASINI : *Spectroscopie pratique dans le domaine du visible et de l'ultraviolet*. BUP 784, Mai 1996.
- [107] C. MORE et D. AUGIER : *Physique MP-MP**. Référence prépa. Tec&Doc, 2009.
- [108] R. MÉRAT, R. MOREAU, R. ALLAY, J.-P. DUBOS, J. LAFARGUE et R. LE GOFF : *Génie électrotechnique*. Nathan, 2007.
- [109] S. OLIVIER : *Physique des ondes – Électromagnétisme et optique*. Tec&Doc, 1995.
- [110] S. OLIVIER : *Physique PC-PC**. Référence prépa. Tec&Doc, 2009.
- [111] S. OLIVIER et H. GIÉ : *Thermodynamique 1ère et 2ème année*. Tec&Doc, 1996.
- [112] J.-M. PARISI, S. BERTHELOT, D. CHAPELAIN, G. DUPUIS et J. FANGEUX : *Chimie Terminale S*. Belin, 2006.
- [113] C. PERRAUDIN, M. BRUSNEL, M. KÉROAS et G. POSTANSQUE : *Physique Chimie Terminale SMS*. Nathan, 2002.
- [114] G. PIETRYK : *Panorama de la physique*. Belin, 2007.
- [115] B. PORTELLI et J. BARTHES : *La physique par la pratique*. H&K, 2005.
- [116] J. PÉREZ, E. BELLANGER, X. DUCROS, V. RENVOIZÉ et P. ROUX : *Physique PCSI-MPSI-PTSI*. Cap Prépa. Pearson, 2010.
- [117] J.-P. PÉREZ : *Mécanique : fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [118] J.-P. PÉREZ : *Thermodynamique : fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [119] J.-P. PÉREZ et E. ANTERRIEU : *Optique : fondements et applications*. Dunod, 2004.
- [120] J.-P. PÉREZ et E. ANTERRIEU : *Relativité et invariance : fondements et applications*. Dunod, 2005.
- [121] J.-P. PÉREZ, R. CARLES et R. FLECKINGER : *Électromagnétisme : fondements et applications*. Dunod, 2001.
- [122] V. PRÉVOST, C. LANGRAND et J. VIDAL : *L'aspartame : un édulcorant intense*. BUP 847, Octobre 2002.
- [123] L. QUARANTA et D. AUBERT : *Dictionnaire de physique expérimentale, tome 1 : Mécanique*. Pierron, 1996.
- [124] L. QUARANTA, D. AUBERT, J.-M. DONINI et G. GERMAIN : *Dictionnaire de physique expérimentale, tome 3 : Électronique*. Pierron, 1996.
- [125] L. QUARANTA, D. AUBERT, J.-M. DONINI et G. GERMAIN : *Dictionnaire de physique expérimentale, tome 4 : Électricité*. Pierron, 1996.
- [126] L. QUARANTA et J.-M. DONINI : *Dictionnaire de physique expérimentale, tome 2 : Thermodynamique et applications*. Pierron, 1997. Prendre systématiquement la 2e édition qui est plus complète.
- [127] C. RAY et J.-C. POIZAT : *La physique par les objets quotidiens*. Belin, 2007.

- [128] V. RENVOIZÉ, E. BELLANGER, R. GIRARDI, S. PAULIN, B. PORTELLI et E. SAUDRAIS : *Physique MP-MP**. Cap Prépa. Pearson, 2010.
- [129] V. RENVOIZÉ, E. BELLANGER, R. GIRARDI, S. PAULIN, B. PORTELLI et E. SAUDRAIS : *Physique PC-PC**. Cap Prépa. Pearson, 2010.
- [130] V. RENVOIZÉ, E. BELLANGER, R. GIRARDI, S. PAULIN, B. PORTELLI et E. SAUDRAIS : *Physique PSI-PSI**. Cap Prépa. Pearson, 2010.
- [131] M.-N. SANZ, A.-E. BADEL et F. CLAUSSET : *Tout-en-un Physique PCSI-MPSI-PTSI*. Dunod, 2003.
- [132] M.-N. SANZ et B. SALAMITO : *Tout-en-un Physique PC-PC**. Dunod, 2010.
- [133] M.-N. SANZ, B. SALAMITO, S. CORBEL, A.-E. BADEL et S. CARDINI : *Tout-en-un Physique PSI-PSI**. Dunod, 2010.
- [134] J. SARRAZIN et M. VERDAGUER : *L'oxydoréduction – Concepts et expériences*. Ellipses, 1997.
- [135] C. SEMAY et B. SILVESTRE-BRAC : *Relativité restreinte, bases et applications*. Dunod, 2010.
- [136] SEXTANT (COLLECTIF) : *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.
- [137] J. SIVARDIÈRE : *La symétrie en mathématiques, physique et chimie*. Presses Universitaires de Grenoble, 1995.
- [138] R. TAILLET : *Optique physique*. de Boeck, 2006.
- [139] R. TAILLET, L. VILLAIN et P. FEBVRE : *Dictionnaire de physique*. de Boeck, 2009.
- [140] A. TOMASINO *et al.* : *Chimie Terminale S*. Nathan, 2002.
- [141] L. VALENTIN : *Physique subatomique : noyaux et particules*. Hermann, 1975.
- [142] R. VENTO *et al.* : *Physique Chimie Terminale ST2S*. Bordas, 2009.
- [143] J.-L. VIGNES, M. ABDRAH, J.-M. BABY et C. EUSÈBE : *Une vie de zinc*. BUP 770, Janvier 1995.
- [144] J.-L. VIGNES et Y. JEHANNE : *L'hydrométallurgie*. BUP 857, Octobre 2003.
- [145] C.-H. VIGOUROUX : *Actualisation des connaissances sur les moteurs électriques*. BUP 846, Juillet 2002.
- [146] M. VILLAIN : *Automatique tome II : systèmes asservis linéaires*. Ellipses, 1997.
- [147] J.-G. VILLAR, M. AUDE, J.-C. DESARNAUD, B. DURIAUD, F. GAUBERT, N. HERVÉ, M. LAINÉ, J.-L. MAURIN, C. MÉRIGEAU et J.-C. PAUL : *Chimie Première S*. Galiéolo. Bordas, 2001.
- [148] J.-G. VILLAR, M. AUDE, J.-C. DESARNAUD, B. DURIAUD, F. GAUBERT, N. HERVÉ, M. LAINÉ, J.-L. MAURIN, C. MÉRIGEAU et J.-C. PAUL : *Chimie Terminale S*. Galiéolo. Bordas, 2001.
- [149] J.-G. VILLAR, J. COUP, J. FOISSY, C. GHESQUIÈRE, M. JAN, M. LAINÉ, E. MALVEZIN, A. MARGARIT, J.-L. MAURIN, C. MÉRIGEAU et L. RENARD : *Physique Chimie Terminale S spécialité*. Galiéolo. Bordas, 2002.