
Agrégation session 2015
Plans et remarques

Mickaël MELZANI
École Normale Supérieure de Lyon

Sommaire

Sommaire	1
1 Préambule	6
1.1 Avertissement	6
1.2 Liens utiles	6
2 Introduction	8
Généralités sur les leçons de physique	8
Sur les montages	8
Incertitudes	8
Incertitudes	15
3 Mécanique, mécanique des fluides	23
LP 1 – Contact entre solides, frottements	23
LP 2 – Caractère non galiléen du référentiel terrestre	27
LP 3 – Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique	30
LP 4 – Lois de conservation en dynamique	34
LP 5 – Cinématique relativiste	39
LP 6 – Dynamique relativiste	42
LP 7 – Notion de viscosité d’un fluide. Écoulement visqueux.	44
LP 8 – Modèle de l’écoulement parfait d’un fluide	47
LP 9 – Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	52
MP 1 – Dynamique newtonienne	54
MP 2 – Surfaces et interfaces	56
MP 3 – Dynamique des fluides	58
4 Thermodynamique	60
LP 10 – Gaz parfaits, gaz réels	60
LP 11 – Premier principe de la thermodynamique	63
LP 12 – Évolution et condition d’équilibre d’un système thermodynamique fermé	67

LP 13 – Application des deux premiers principes de la thermodynamique aux fonction- nement des machines thermiques	73
LP 14 – Transitions de phase	78
LP 16 – Rayonnement d’équilibre thermique. Corps noir.	82
LP 17 – Phénomènes de transports	86
LP 18 – Flux conductifs, convectifs, radiatifs, bilans thermiques	88
MP 5 – Mesure de température	91
MP 6 – Transitions de phase	94
MP 34 – Phénomènes de transport	96
5 Électromagnétisme	97
LP 19 – Conversion de puissance électromécanique	97
LP 20 – Induction électromagnétique	99
LP 27 – Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques	101
LP 28 – Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs	104
LP 29 – Rayonnement dipolaire électrique	106
LP 45 – Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques	111
MP 15 – Production et mesure de champs magnétiques	115
MP 16 – Milieux magnétiques	117
MP 19 – Effets capacitifs	120
MP 20 – Induction, auto-induction	123
MP 21 – Production et conversion d’énergie électrique	126
MP 35 – Moteurs	130
6 Ondes	133
LP 23 – Ondes progressives, ondes stationnaires	133
LP 24 – Ondes acoustiques	137
LP 25 – Propagation dans un milieu dispersif	140
LP 26 – Propagation guidée des ondes	143
MP 29 – Ondes : propagation et condition aux limites	147
MP 30 – Acoustique	148
7 Optique géométrique et ondulatoire	151
LP 30 – Présentation de l’optique géométrique à l’aide du principe de Fermat	151
LP 31 – Interférences à deux ondes en optique	154
LP 32 – Interféromètres à division d’amplitude	158
LP 33 – Diffraction de Fraunhofer	161
LP 34 – Diffraction par des structures périodiques	164
MP 7 – Instruments d’optique	167

MP 8 – Interférences lumineuses	171
MP 9 – Diffraction des ondes lumineuses	173
MP 10 – Spectroscopie optique	175
MP 11 – Émission, absorption de la lumière	177
MP 12 – Photorécepteurs	180
MP 13 – Biréfringence, pouvoir rotatoire	182
MP 14 – Polarisation des ondes électromagnétiques	184
8 Mécanique quantique	187
LP 35 – Absorption et émission de la lumière	187
LP 36 – Aspect corpusculaire du rayonnement. Notion de photon	190
LP 37 – Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d’onde	193
LP 38 – Confinement d’une particule et quantification de l’énergie	195
LP 39 – Effet tunnel	198
LP 40 – Fusion, fission	200
LP 41 – Évolution temporelle d’un système quantique à deux niveaux	205
LP 42 – Molécules : stabilité, énergie	208
9 Physique statistique	212
LP 15 – Étude statistique d’un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique.	212
LP 43 – Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques	215
LP 44 – Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation du champ moyen	218
LP 46 – Mécanismes de la conduction électrique dans les solides	221
MP 17 – Métaux	224
MP 18 – Matériaux semi-conducteurs	226
10 Signaux	229
LP 21 – Rétroaction et oscillations	229
LP 22 – Traitement d’un signal. Étude spectrale.	233
LP 47 – Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique	235
LP 48 – Oscillateurs ; portrait de phase et non-linéarités	238
MP 4 – Capteurs de grandeurs mécaniques	242
MP 22 – Amplification de signaux	245
MP 23 – Mise en forme, transport et détection de l’information	247
MP 24 – Acquisition, analyse et traitement des signaux	248
MP 25 – Mesure de fréquences temporelles (domaine de l’optique exclu)	250
MP 26 – Mesure de longueurs	252
MP 27 – Systèmes bouclés	254

MP 28 – Instabilités et phénomènes non-linéaires	257
MP 31 – Résonance	259
MP 32 – Couplage des oscillateurs	262
MP 33 – Régimes transitoires	264
11 Leçons de chimie	266
LC 1 – Chimie et couleur (L)	266
LC 2 – Séparations, purifications, contrôle de pureté (L)	269
LC 3 – Polymères (L)	270
LC 4 – Chimie et développement durable (L)	272
LC 5 – Synthèse inorganique (L)	274
LC 6 – Stratégies en synthèse organique (L)	276
LC 7 – Dosages (L)	278
LC 8 – Facteurs cinétiques (L)	280
LC 9 – Caractérisations par spectroscopie en synthèse organique (L)	282
LC 10 – Relation structure réactivité en chimie organique (L)	284
LC 11 – Capteurs électrochimiques (L)	286
LC 12 – Molécules de la santé (L)	288
LC 13 – Structures et propriétés de molécules du vivant (L)	289
LC 14 – Réaction chimique par échange de proton (L)	292
LC 15 – Solvants (CP)	294
LC 16 – Classification périodique (CP)	296
LC 17 – Solides cristallins (CP)	298
LC 18 – Corps purs et mélanges binaires (CP)	300
LC 19 – Oxydoréduction (CP)	306
LC 20 – Détermination de constantes d'équilibre (CP)	308
LC 21 – Dosages suivis par potentiométrie (CP)	309
LC 22 – Cinétique homogène (CP)	310
LC 23 – Évolution et équilibre chimique (CP)	312
LC 24 – Optimisation de synthèses industrielles (CP)	314
LC 25 – Diagrammes potentiel-pH (construction exclue) (CP)	317
LC 26 – Corrosion humide des métaux (CP)	319
LC 27 – Stéréochimie (CP)	321
LC 28 – Conversion réciproque d'énergie électrique en énergie chimique (CP)	323
LC 29 – Solubilité (CP)	325
LC 30 – Cinétique électrochimique (CP)	327
Remarques sur les manipulations	329

Chapitre 1

Préambule

Avertissement

Ce document regroupe les plans que j'ai mis au point pendant mon année de préparation à l'agrégation, à l'ENS de Lyon, session 2015. Il contient également diverses remarques et commentaires sur la physique (et un peu sur la chimie).

Le but de cet avertissement est de rendre clairs certains points :

- Un plan de leçon est personnel. Il faut s'inspirer d'exemples des années précédentes (afin d'éviter les hors-sujets et pour gagner du temps) pour élaborer les siens.
- Un plan de leçon tel que donné ici peut donner lieu à beaucoup de leçons différentes, en fonction de ce qui est dit et mis dans chaque partie.

Il est donc absurde d'accorder trop d'importance à des affirmations du type "il a fait ce plan et il a eu 20", ou "il a fait ça et il a eu 3"...

Pour citer un ami, dont vous avez probablement aussi trouvé les plans de leçons :

"L'équation 'un plan = une note' est grossièrement fautive. Une équation approximée mais plus juste serait plutôt :

$$\text{une note} = \text{qualité scientifique} \times \text{qualité pédagogique} \times \text{qualité de présentation.}$$

Il s'agit bien d'un produit plutôt que d'une somme, et le plan intervient un peu dans chacun des facteurs."

Et je suis entièrement d'accord avec ceci.

- Les remarques présentes dans ce document sont faites par moi-même et ont été rédigées en cours d'année. Elles peuvent être fausses, elles peuvent être incompréhensibles. Je les laisse tout de même en espérant qu'elles seront parfois utiles.

Liens utiles

Le site semi-officiel de l'agrégation de physique :

<http://agregation-physique.org/>

Tout sur la chimie industrielle :

<http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm>

Cours de prépa intéressants :

<http://www.matthieurigaut.net/>

Banque d'image :

<http://cdrom.agregation-physique.org> agphy, agreg2014

BO sur les affectations rentrée 2015 :

http://www.education.gouv.fr/pid25535/bulletin_officiel.html?cid_bo=87766

Chapitre 2

Introduction

Sur les leçons de physique

Je vais répéter encore une fois l'équation du préambule : une note = qualité scientifique \times qualité pédagogique \times qualité de présentation.

Je crois qu'il ne faut pas sous-estimer l'importance de la qualité pédagogique. On peut avoir une très bonne note avec un contenu scientifique modeste, mais bien maîtrisé et présenté de façon pédagogique. Au contraire, on est certain d'avoir une mauvaise note avec un contenu scientifique de haut niveau, à moitié et mal présenté. Donc : restez modeste !

Généralités sur les montages

Quelques remarques :

- Pendant l'année de préparation, on prévoit souvent d'en faire trop.
- Trois manips quantitatives bien présentées / exploitées / discutées suffisent pour avoir 18. (Voir par exemple mon retour sur le montage 12, photorécepteurs.)
- Expliquer un (et pas plus) calcul d'incertitude.
- Ne pas prendre plusieurs points de mesure devant le jury : c'est redondant. Le faire seulement si ça ne colle pas avec les points de la préparation.
- Écrire suffisamment d'informations au tableau pour que le jury puisse refaire tous les calculs.
- Pour chaque manipulation, donner son intérêt pédagogique et scientifique, expliquer le principe physique.

De façon générale, mettre en scène nos compétences expérimentales, notre regard critique, en pointant les limites des protocoles utilisés (sans tomber dans l'excès...).

Incertitudes de type A et B

Le traitement des incertitudes est un élément clé de la démarche scientifique. Par nature, une mesure est associée à une incertitude. C'est grâce à l'estimation de celle-ci que l'on peut dire si oui ou non les mesures expérimentales sont compatibles avec les prédictions théoriques. Sans incertitudes elles ne le seraient jamais strictement et toujours à peu près... et la science n'avancerait pas.

Comment présenter le traitement des incertitudes ? Tout dépend bien sûr du niveau visé, et on ne dira pas la même chose dans une classe de terminale, dans une CPGE, en préparation à l'agrégation ou en Master de métrologie...

Les notes qui suivent visent plutôt le niveau agrégation, niveau pour lequel les mesures effectuées ne sont pas si précises que cela, le nombre de points souvent inférieur à la dizaine, les lois de distribution des incertitudes inconnues... Un traitement rigoureux des incertitudes ne semble donc pas justifié, et serait parfois un peu ridicule. Encore faut-il savoir en quoi consiste, ou consisterait, le traitement rigoureux.

L'idée générale est donc de connaître suffisamment les résultats théoriques pour pouvoir mieux les ignorer en pratique.

Plan

La suite de cette page n'est pas un cours complet sur les incertitudes, elle vise plutôt à approfondir et préciser certains points. Il est donc supposé que le lecteur connaît déjà les éléments de base.

On peut par ailleurs consulter le polycopié donné dans ma classe de TSI2 qui résume les points essentiels sur la gestion des incertitudes. Mais attention, il s'agit d'un poly pour des étudiants en CPGE et qui est donc de niveau introductif - certains raccourcis pourront paraître choquants.

Le paragraphe qui suit donne les "recettes" simplifiées retenues par l'auteur pour gérer les incertitudes. Elles suffisent amplement pour un travail scolaire. Les paragraphes qui suivent sont plus rigoureux et permettent justement de comprendre pourquoi il est possible de se restreindre aux "recettes".

Intervalle de confiance associé aux diverses lois

Lorsque l'on donne une incertitude, il faut l'associer à un intervalle de confiance. Par exemple on dira que nos mesures de longueur d'onde d'une raie spectrale mènent à l'estimation $\lambda = 547 \pm 3$ nm avec un intervalle de confiance de 95%. Cela signifie que la valeur vraie a 95% de probabilité de se situer dans l'intervalle donné.

L'idée générale que l'on cherche à justifier ici est que, pour un TP dans le secondaire, en CPGE ou en préparation à l'agrégation, il suffit d'utiliser les règles suivantes :

- L'intervalle à \pm une incertitude type, $x \pm u(x)$, correspond à un intervalle de confiance de 70% environ.
- Pour obtenir l'intervalle de confiance élargi à 95%, écrit $x \pm \Delta x_{95\%}$, on peut utiliser $\Delta x_{95\%} \simeq 2u(x)$.
Si on veut déduire l'incertitude type $u(x)$ à partir de $\Delta x_{95\%}$, on peut utiliser de même $u(x) \simeq \Delta x_{95\%}/2$.
- Lors du calcul d'une incertitude sur une grandeur composée, par exemple $f = f(x, y, z)$, on peut utiliser la formule de propagation des erreurs indifféremment pour les incertitudes types (ce qui est rigoureux si les x_i sont indépendants) ou pour les incertitudes élargies (ce qui n'est pas rigoureux, mais permis par le fait qu'on utilise ici $\Delta x_{95\%} \simeq 2u(x)$ pour toutes les grandeurs).
- Lors d'une estimation d'incertitude de type A, on oublie les coefficients de Student. On estime l'incertitude type avec la formule habituelle en $u(\bar{x}) = \sigma_{\text{exp}}/\sqrt{N}$, et on l'élargit à 95% en multipliant là encore par 2.
- On estime les incertitudes de type B en faisant preuve de bon sens et sans se soucier

des distributions suivies : un instrument gradué à 2δ près donne une incertitude élargie pour $\pm\delta$ et son écart type est de $\delta/2$, une notice constructeur indique une incertitude élargie (sauf mention contraire), etc. (voir polycopié incertitudes pour une liste).

Reprenons chacun de ces points dans l'ordre et expliquons pourquoi ils ne sont pas tout à fait corrects :

- $x \pm u(x)$ correspond à un niveau de confiance de 68% pour une distribution gaussienne. C'est différent pour une distribution uniforme, triangle, de Student, etc...
- De même, on a la relation $\Delta x_{95\%} \simeq 2u(x)$ ($1.96u(x)$ pour être précis) pour une loi gaussienne seulement. Le coefficient d'élargissement est différent de 2 pour d'autres lois.
- Si on a une fonction $f(x, y, z)$, la densité de probabilité de f est en générale difficile à obtenir et n'est que rarement gaussienne (elle l'est si f est la somme de variables indépendantes gaussiennes, mais c'est à peu près le seul cas). On peut donc calculer $u(f)$ par la formule de propagation des incertitudes, mais on ne peut pas en déduire facilement $\Delta f_{95\%}$. On verra toutefois qu'utiliser un facteur d'élargissement de 2, que la loi soit uniforme ou triangulaire, mène à un résultat suffisamment proche du résultat rigoureux pour pouvoir être utilisé (cf illustration avec $f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$).
- En toute rigueur l'intervalle de confiance à 95% est donné par $\pm u(\bar{x}) \times t_{95\%}^{N-1}$ (sous l'hypothèse de x_i gaussiens). On verra dans le paragraphe sur l'incertitude de type A que le coefficient de Student $t_{95\%}^{N-1}$ est proche de 2 (2.8 pour 5 points, 2.3 pour 10 points), et on rappellera que l'incertitude sur l'incertitude type $u(\bar{x})$ est elle-même de 24% au moins pour moins de 10 points... Ce qui rend superflue l'utilisation de $t_{95\%}^{N-1}$.
- En toute rigueur, il faudrait utiliser une loi uniforme pour un instrument gradué, une loi triangle pour estimer une plage de netteté, etc. (et encore, cela se discute...)

On a alors des relations exactes, par exemple pour une loi uniforme x de demi-largeur δ on a $u(x) = \delta/\sqrt{3}$ et $\Delta x_{95\%} = 1.6\delta/\sqrt{3}$. Mais $1.6/\sqrt{3} = 0.92$, et on comprend bien qu'on peut arrondir ceci à $\Delta x_{95\%} = \delta$, ce qui a l'avantage d'être intuitif, et n'a aucun impact sur la précision de la discussion étant donné qu'il y a toujours globalement une incertitude sur l'incertitude de l'ordre de 10% à 20%, voire plus.

Les deux paragraphes qui suivent, intitulés “des détails : ...”, présentent les résultats rigoureux et permettent de justifier chacune des règles approximatives énoncées ci-dessus.

Il faut les lire en ayant à l'esprit que l'estimation de l'incertitude est... une estimation. On peut montrer par exemple que sur une série de mesures, l'incertitude de type A obtenue possède elle-même une incertitude de l'ordre de 10% tant qu'on ne dépasse pas la vingtaine de points. C'est aussi pour cela qu'on conseille de ne garder qu'un chiffre significatif dans son écriture.

Des détails : intervalle de confiance associé aux diverses lois

Mesurons donc une grandeur x , vue comme une variable aléatoire de loi de probabilité $p(x)$. On note $u(x)$ l'écart-type de la loi, qui est aussi par définition l'incertitude type de x .

On souhaite déterminer un intervalle de confiance $x \pm \Delta x_\alpha$ associé à un niveau de confiance α donné ($\alpha = 95\%$, 99% , etc.). Quel est le lien entre Δx_α et $u(x)$?

Les définitions sont les suivantes, et tout est donc une affaire de calcul :

$$u(x) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)(x - \bar{x})^2 dx}, \quad (2.1)$$

$$\Delta x_\alpha \text{ est tel que } \int_{\bar{x} - \Delta x_\alpha}^{\bar{x} + \Delta x_\alpha} p(x) dx = \alpha. \quad (2.2)$$

On note $\Delta x_\alpha = f_\alpha u(x)$ avec f_α le facteur d'élargissement. Ce dernier dépend donc de la loi de probabilité $p(x)$ suivie par x . Le tableau ci-dessous donne quelques exemples :

Loi	$u(x)$	$f_{68\%}$	$f_{95\%}$	$f_{99\%}$
Normale		0.99	1.96	2.58
Triangle de demi-largeur δ	$\frac{\delta}{\sqrt{6}}$	1.1	1.9	2.2
Uniforme de demi-largeur δ	$\frac{\delta}{\sqrt{3}}$	1.2	1.6	1.7

Facteur par lequel multiplier l'incertitude type $u(x)$ pour obtenir Δx_α , afin que l'intervalle $x \pm \Delta x_\alpha$ corresponde à un niveau de confiance α .

Pour la loi uniforme, on a $\Delta x_\alpha = \alpha\delta$, ce qui est plutôt logique. En particulier $\Delta x_\alpha = \delta$ correspond à $\alpha = 100\%$. On a également $f_\alpha = \sqrt{3}\alpha$.

La loi triangle va de $-\delta$ à δ , sa hauteur est $1/\delta$ afin qu'elle soit normalisée. On a $\Delta x_\alpha = \delta(1 - \sqrt{1 - \alpha})$. Ici aussi $\Delta x_\alpha = \delta$ correspond à $\alpha = 100\%$. On a également $f_\alpha = \sqrt{6}(1 - \sqrt{1 - \alpha})$.

Pour ces deux lois, il est plus parlant de donner le "facteur d'élargissement" par lequel multiplier δ , c'est-à-dire $f'_\alpha = \Delta x_\alpha / \delta$:

Loi	$f'_{68\%}$	$f'_{95\%}$	$f'_{99\%}$
Triangle de demi-largeur δ	0.4	0.8	0.9
Uniforme de demi-largeur δ	0.68	0.95	0.99

Facteur par lequel multiplier la demi-largeur δ pour obtenir Δx_α , afin que que l'intervalle $x \pm \Delta x_\alpha$ corresponde à un niveau de confiance α .

On voit ainsi que si on veut considérer des incertitudes élargies à 95%, il faut considérer $\pm 0.8\delta$ ou $\pm 0.95\delta$ pour des lois triangle ou uniforme. On pourra donc sans mal arrondir ceci à $\pm \delta$ sans être trop imprécis.

Notons que ceci permet aussi d'éviter la situation un peu absurde, rencontrée dans certains livres qui se veulent trop rigoureux, où on considère pour la loi uniforme que $u(x) = \delta/\sqrt{3}$ sans approximation, puis que $\Delta x_{95\%} = 2u(x)$ (ce qui est faux car valide pour la loi gaussienne uniquement), et qui aboutit à $\Delta x_{95\%} = 2\delta/\sqrt{3} = 1.2\delta$! Il n'y a évidemment pas de sens à dépasser δ , puisque pour $\pm \delta$ l'intervalle de confiance est déjà de 100%... Soit on est rigoureux et on utilise le tableau ci-dessus, soit on est raisonnable et on utilise l'approximation du paragraphe précédent.

Des détails : propagation des incertitudes sur une mesure et intervalle de confiance

On considère une grandeur f qui dépend d'autres grandeurs x_1, \dots, x_n .

Par exemple on mesure une distance d , un temps de chute t , et on souhaite en déduire la vitesse $f = d/t$.

Si on note $u(x_i)$ l'incertitude type de la variable x_i , et qu'on suppose les x_i indépendants, alors l'incertitude type sur f est :

$$u(f) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u(x_i)^2}. \quad (2.3)$$

Diverses remarques :

- Si les x_i ne sont pas indépendants, on doit utiliser $u(f)^2 = \sum_{i,j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j)$.
- On peut généraliser cette formule à la combinaison d'incertitudes de type A et B : ce sont bien les carrés des incertitudes types qui s'ajoutent, $u(f)^2 = u(x)_{\text{type A}}^2 + u(x)_{\text{type B}}^2$.
Par exemple $u(x)_{\text{type A}}$ peut être une incertitude calculée sur plusieurs réalisations d'une expérience de chute d'une réglette, et $u(x)_{\text{type B}}$ l'incertitude issue de la notice constructeur du chronomètre utilisé.
- Ce ne sont que les incertitudes types qui s'ajoutent (et certainement pas les incertitudes élargies).

Rappelons qu'une incertitude type est définie comme l'écart type de la distribution de probabilité $p(x)$: $u(x) = \sqrt{\int p(x)(x - \bar{x})^2}$.

Si on veut obtenir une formule donnant l'incertitude élargie sur f , associée à un certain intervalle de confiance, c'est impossible en général. Idem si on veut connaître l'intervalle de confiance associé à $\pm u(f)$. La raison est que l'on ne connaît pas la distribution de probabilité de f .

Il y a néanmoins plusieurs cas qui peuvent permettre d'obtenir un résultat :

- Une somme de variables aléatoires gaussiennes indépendantes est une variable aléatoire gaussienne. Mais on rencontre rarement ce cas en pratique.
- Une somme de N variables aléatoires indépendantes est une variable aléatoire dont la distribution tend vers une gaussienne lorsque $N \gg 1$.
Ceci peut-être utilisé lorsque $f = \frac{1}{N} \sum_i x_i$ est une moyenne.
- On peut réaliser des simulations Monte Carlo afin d'obtenir des résultats rigoureux au cas par cas si on connaît les distributions de chacun des x_i . Le logiciel Gum MC permet de faire ceci.
- Certaines fois le calcul est possible. Voir paragraphe suivant où on traite le cas $f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$.

Un exemple d'incertitude composée : $f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$

On s'intéresse au cas de $f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$. C'est un cas plutôt fréquent, car il arrive à chaque fois qu'on mesure une quantité par différence : différence de longueurs, de volumes, d'angles, etc.

On suppose qu'il y a égalité des incertitudes types : $u(x_1) = u(x_2)$, que l'on note $u(x)$.

La formule de propagation des incertitudes (types) indique que $u(f)^2 = u(x_1)^2 + u(x_2)^2$, d'où

$$u(f) = \sqrt{2}u(x).$$

- Comment interpréter ce résultat ? Pourquoi n'est-ce pas $u(f) = 2 \times u(x)$?
Simplement, il est rare qu'une erreur sur x_1 et une erreur sur x_2 aillent dans le même sens. Si je mesure un angle θ_1 , puis un angle θ_2 , il est rare que je fasse une erreur qui surestime θ_1 et en même temps une qui surestime θ_2 . C'est pourquoi l'incertitude type de f n'est pas $2 \times u(x)$, mais est plus faible.
- Comment ensuite obtenir une incertitude élargie à 95% à partir de $u(f)$?
On suppose que x_1 et x_2 sont distribués selon des loi uniformes (rectangulaires) de demi-largeurs δ . Pour une règle graduée au millimètre, $2\delta = 1$ mm.
 - Si on reste approximatif, on multiplie $u(f)$ par deux : $\Delta f_{95\%} = 2u(f)$. Comme on est aussi approximatif sur x_1 et x_2 , on a $\Delta x_{95\%} = 2u(x)$, et donc $\Delta f_{95\%} = \sqrt{2}\Delta x_{95\%}$.
 - Cependant, pour être rigoureux il faut bien comprendre que la loi suivie par f n'est pas gaussienne, et que le facteur d'élargissement n'est donc pas 2.

Dans le cas présent, on peut montrer soit mathématiquement soit avec une simulation Monte Carlo via Gum MC que si x_1 et x_2 sont distribués selon des loi uniformes (rectangulaires) de demi-largeurs δ , alors l'histogramme de f est une distribution triangle de demi-largeur 2δ (ce qui est logique si on y réfléchit).

Le second tableau ci-dessous indique alors que $\Delta f_{95\%}$ est la demi-largeur multipliée par 0.8, d'où $\Delta f_{95\%} = 0.8 \times 2\delta$.

En conclusion, l'approche rigoureuse donne $\Delta f_{95\%} = 1.6\delta$, et l'approche approximative $\Delta f_{95\%} = 1.4\delta$. On voit qu'il n'y a pas de différence significative.

On pourrait même d'ailleurs oublier le $\sqrt{2}$ de l'approche approximative et utiliser $\Delta f_{95\%} = 2\delta$.

Incertitude de type B

C'est une incertitude associée à une seule mesure. Voir le poly sur les incertitudes pour des méthodes dans différents cas (règle ou autre instrument gradué tel que goniomètre, burette, banc optique; instrument jaugé; voltmètre; oscilloscope; ...).

On en profite ici pour développer un exemple : comprendre d'où provient l'incertitude de type B donnée dans la notice d'un voltmètre.

Celle-ci est souvent donnée sous la forme d'un pourcentage de la valeur lue, plus un nombre de digits à ajouter au dernier chiffre significatif, par exemple $\pm 10\% + 10d$. Voir le poly pour la façon dont utiliser ceci. Ici on cherche plutôt à comprendre ce qui, au niveau du fonctionnement du voltmètre, justifie cette forme d'incertitude.

- Nombre de digits à ajouter au dernier chiffre significatif : le pas de quantification¹ est en partie à l'origine de l'erreur en ± 1 digit sur les voltmètres, elle est aléatoire. On ajoute également \pm d'autres digits si on prend en compte un offset dû à un mauvais calibrage de l'appareil.
- L'incertitude exprimée en % de la valeur totale résulte en partie de défauts systématiques de l'appareil, par exemple des non-linéarités dans la rampe du convertisseur analogique-numérique², d'un offset au départ de la rampe, etc... C'est donc en première estimation une erreur systématique, identique d'un appareil à l'autre.

Rq : Le pas de quantification donne aussi la résolution, plus petite variation de la grandeur d'entrée faisant varier la sortie.

Des détails : Incertitude de type A

Voir le poly pour des généralités.

C'est une incertitude statistique, pour des séries de mesures répétées N fois (plus de ~ 5 fois pour que cela ait un sens statistique).

On a donc une série de mesures x_1, x_2, \dots, x_N d'un même mesurande. Par exemple, on mesure plusieurs fois le temps de chute d'un objet depuis une hauteur de 1 m.

On peut estimer l'incertitude type de x à l'aide de l'écart type de la série de données :

$$u(x) = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.4)$$

1. C'est la plus petite variation possible de la grandeur de sortie, voir par exemple Taillet, Dictionnaire de physique, ou Asch, Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur.

2. Voir MP24 p. 248 pour le principe d'une mesure de tension continue.

Alors :

- La meilleure estimation de la valeur vraie X_{vraie} est la moyenne des mesures :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2.5)$$

- La meilleure estimation de l'incertitude type de \bar{x} , $u(\bar{x})$, est l'écart-type de la série de donnée, divisée par \sqrt{N} :

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \times \sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \times \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.6)$$

On rappelle en effet que l'écart-type d'une série de données donne une idée de la dispersion ou de l'étalement des données. Le facteur $1/\sqrt{N}$ montre que *plus on fait de mesures*, plus l'incertitude sera faible et donc *plus le résultat sera précis*. Attention, il ne s'agit pas réellement de l'incertitude type de la v.a. \bar{x} , mais d'une estimation de celle-ci. En toute rigueur on devrait la noter autrement.

Attention, comme d'habitude : (i) on ne connaît pas le niveau de confiance α associé à l'intervalle $\bar{x} \pm u(\bar{x})$ et (ii) on ne connaît pas le facteur d'élargissement par lequel multiplier $u(\bar{x})$ si on veut obtenir un niveau de confiance donné (de 95% par exemple), ceci parce qu'on ne connaît pas la loi de probabilité suivie par \bar{x} .

Comment faire ?

Il faut au moins faire une hypothèse sur la loi suivie par les x_i . On suppose donc qu'il s'agit d'une loi normale. Ainsi la moyenne \bar{x} , qui est une somme de v.a. normale, suit une loi normale. Mais on ne connaît pas en pratique son incertitude type : on ne peut donc pas utiliser ce résultat directement. Au lieu de cela, on possède une estimation de l'incertitude type, $u(\bar{x})$ donné ci-dessus.

On peut alors démontrer que l'intervalle $\bar{x} \pm t_{\alpha}^{N-1} u(\bar{x})$ correspond à un niveau de confiance α , où t_{α}^{N-1} est appelé coefficient de Student.

Précisons les valeurs de t_{α}^{N-1} :

Niveau de confiance	70%	95%
Nombre de points		
3	1.39	12.7
5	1.19	2.78
7	1.13	2.45
10	1.1	2.26
15	1.08	2.15
30	1.06	2.05
∞	1.04	1.96

Coefficient de Student t_{α}^{N-1} . Il existe des tables sur internet. Attention, comme on considère un intervalle bilatéral, il faut lire dans ces tables avec le niveau $1 - (1 - \alpha)/2$. Cf la table du wikipédia anglais, https://en.wikipedia.org/wiki/Student%27s_t-distribution#Table_of_selected_values.

La question est donc de savoir si on peut utiliser la recette approximative $\Delta \bar{x}_{95\%} \simeq 2u(\bar{x})$ avec $u(\bar{x})$ estimé ci-dessus. La table nous apprend que le résultat rigoureux est $\Delta \bar{x}_{95\%} = 2.8u(\bar{x})$ pour 5 mesures, $2.3u(\bar{x})$ pour 10 mesures, etc. J'aurais donc tendance à dire que oui, on peut. D'autant plus si on se souvient que la statistique suivie par les x_i n'est pas nécessairement gaussienne, et que même dans ce cas $u(\bar{x})$ est un estimateur de l'écart type de la loi, qui

présente lui même une incertitude dont on montre qu'elle est de 24% pour $N = 10$ et de 10% pour $N = 50$, ce qui n'est pas rien.

Attention enfin, toute cette approche statistique n'a d'intérêt que si l'erreur commise lors de la lecture est aléatoire, et grossièrement gaussienne. Une condition essentielle est qu'il faut que l'instrument de mesure soit assez précis pour que l'erreur commise soit aléatoire. S'il ne l'est pas, il faut ajouter à l'incertitude de type A celle de type B, liée à l'imprécision de l'appareil, selon la formule :

$$\delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{type A}}^2 + \Delta x_{\text{type B}}^2}. \quad (2.7)$$

Ainsi si $\Delta x_{\text{type A}} \ll \Delta x_{\text{type B}}$ il n'est pas utile de le considérer.

Cette dernière formule est générale, et s'applique en fait dans tous les cas (voir exemples ci-dessous).

Exemples concrets pour savoir quand utiliser type A, B ou les deux

Premier exemple : on mesure une distance avec une règle graduée au millimètre. Réaliser plusieurs mesures n'améliorera pas la précision au delà du millimètre. En effet, la mesure donnera toujours le même résultat (ou bien alternera entre deux ou trois résultats si l'opérateur à la main peu sure), et l'écart type σ_{exp} sera nul, et utiliser la formule $u(\bar{x}) = \sigma_{\text{exp}}/\sqrt{N}$ avec N grand donne une incertitude non réaliste. En somme, avec ce matériel de mesure, l'erreur n'est pas aléatoire et ne se prête pas à un traitement statistique. On a alors plutôt $\Delta x = \Delta x_{\text{type B}}$.

Second exemple, moins trivial : on mesure le temps de chute d'une bille dans une colonne de glycérol, en chronométrant le temps de passage entre deux graduations marquées sur la colonne. Il y a une erreur aléatoire due au temps de réaction de l'expérimentateur qui démarre et arrête le chronomètre, ainsi qu'une erreur aléatoire due aux conditions initiales (les conditions de lâcher de la bille). À ceci s'ajoute une erreur non aléatoire, celle de la distance d entre les deux graduations qui est toujours la même. Répéter les mesures et les traiter de façon statistique permet de réduire les deux erreurs aléatoires, mais pas celle sur la distance d . Par exemple si d est connue à 10 cm près, on voit bien que cette incertitude va dominer l'erreur et qu'on ne pourra pas la réduire en répétant les mesures. La méthode générale est donc d'estimer l'incertitude de type A, $\Delta x_{\text{type A}}$, pour une série de mesures, l'incertitude de type B, $\Delta x_{\text{type B}}$, pour une seule mesure, et d'en déduire l'incertitude globale :

$$\delta x = \sqrt{\delta x_{\text{type A}}^2 + \delta x_{\text{type B}}^2}. \quad (2.8)$$

Des formules

Loi $p(x)$.

On a $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$.

Valeur moyenne (ou espérance) : $\bar{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x) dx$.

Écart type (appelé un peu abusivement ici incertitude type) : $u(x) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)(x - \bar{x})^2 dx}$.

Δx_α est tel que $\int_{\bar{x} - \Delta x_\alpha}^{\bar{x} + \Delta x_\alpha} p(x) dx = \alpha$.

Incertitudes : régression linéaire

Quelques mots sur la régression linéaire. Ce qui suit s'applique pour une séance de TP, ou pour un montage à l'agrégation de sciences physiques. Les premiers paragraphes sont assez généraux et donnent des conseils pratiques issus de mon expérience. Le dernier paragraphe, "des éléments théoriques...", est plus technique et vise à donner une introduction à ce qui est effectivement réalisé par les algorithmes de régression linéaire.

Objectif

On dispose de points de mesures, typiquement une liste de couples (X_i, Y_i) .

On souhaite voir si une loi affine, $y = ax + b$, peut convenir pour modéliser ces données.

Si oui, on souhaite connaître les valeurs du "meilleur" couple (a, b) , ainsi que les incertitudes types et élargies sur a et b .

On peut retenir que ceci s'effectue en minimisant la fonction

$$\chi^2(a, b) = \sum_i \frac{[Y_i - (aX_i + b)]^2}{a^2 u(X_i)^2 + u(Y_i)^2} \quad (2.9)$$

par rapport à a et b , où les X_i, Y_i sont les points expérimentaux (les mesures), $u(X_i)$ et $u(Y_i)$ les incertitudes types associées à chaque point (X_i, Y_i) .

La trame principale suivante résume l'ensemble du document. Les paragraphes qui suivent fournissent des détails ou des justifications.

- Identifier des grandeurs X_i et Y_i qui doivent, d'après la théorie et le modèle utilisé, suivre une loi affine $Y_i = a_{\text{théo}}X_i + b_{\text{théo}}$.

Il est possible qu'il y ait une incertitude expérimentale sur $a_{\text{théo}}$ et $b_{\text{théo}}$ (par exemple $a_{\text{théo}} = RC$, les valeurs de R et de C sont connues à incertitude près), que l'on évalue avec les méthodes habituelles pour obtenir $\Delta a_{\text{théo}}$ et $\Delta b_{\text{théo}}$ (incertitudes élargies à 95%).

- Réaliser les mesures X_i et Y_i , estimer les incertitudes associées (en général on obtient des incertitudes élargies à 95%, en déduire alors les incertitudes types en divisant par 2 (voir plus bas)).

- Tracer les points (X_i, Y_i) et tenter une régression linéaire.

Vérifier visuellement si les points sont alignés ou non, s'il y a une tendance ou non (oscillations autour de la droite, parabole, ...). Ce critère visuel reste le meilleur critère (voir paragraphe sur le chi 2 réduit plus bas).

Si les points ne semblent pas alignés, c'est soit que le modèle n'est pas le bon (oubli d'un effet ? mauvaises hypothèses ?), soit qu'il y a eu erreur de manipulation.

- Si les points semblent alignés, on peut relever les valeurs a et b donnés par le programme. On peut les noter a_{exp} et b_{exp} , car il s'agit des valeurs issues de l'expérience, mais on omettra ce exp pour alléger les notations.

Le programme doit également fournir une incertitude sur a et sur b . L'incertitude type $u(a)$ et $u(b)$ est obtenue par le logiciel sans plus d'hypothèses. Il donne également l'incertitude élargie $f_\alpha u(a)$ et $f_\alpha u(b)$ pour un degré de confiance typiquement à 95%, en multipliant $u(a)$ et $u(b)$ par un facteur d'élargissement. Ce dernier est donné par celui d'une distribution de Student, sous l'hypothèse que les X_i et Y_i suivent une loi normale. Il dépend du nombre de points sur lequel est effectué la régression linéaire. On peut remarquer qu'il est important (3 ou 4) si le nombre de points est de 4 ou 5.

On appelle Δa et Δb les incertitudes ainsi obtenues pour un facteur de 95%.

Si $b_{\text{théo}} = 0$, et si $0 \in (b \pm \Delta b)$, on peut recommencer en utilisant un modèle linéaire $y = ax$.

- On vérifie enfin si $a \pm \Delta a$ et $a_{\text{théo}} \pm \Delta a_{\text{théo}}$ ont un intervalle de valeurs communes, et de même pour b .

Programmes disponibles

Différents outils pour effectuer des régressions linéaires en traitant de façon rigoureuse les incertitudes :

- Le programme **Reg Lin MC**, qui est adapté des consignes du Gum. Très complet, permet également des simulations Monte Carlo, ainsi que la visualisation des corrélations entre a et b . Mais un peu difficile d’approche.
- Le logiciel **Régressi**. Rigoureux et intuitif. Très utilisé en séance de TP. Penser à cocher “prendre en compte les incertitudes” pour que celles-ci soient considérées et que les calculs de Δa et Δb correspondent à ce qui est expliqué ici.
- Le programme Python écrit ici

On notera que ces trois programmes retournent exactement les mêmes résultats pour les paramètres a et b et pour les incertitudes types ou élargies à 95% associées. Ils implémentent donc la même approche. Cette approche est détaillée dans la partie “éléments théoriques” plus bas.

Quelles incertitudes entrer pour les données ?

Les incertitudes à entrer dans les programmes listés ci-dessus sont toujours les incertitudes types.

A contrario, on a souvent accès expérimentalement aux incertitudes élargies à 95% : c’est genre d’incertitude fournie par les notices constructeur lorsque rien n’est précisé, c’est aussi une incertitude élargie que l’on considère quand on dit, par exemple, qu’une règle graduée au millimètre donne un résultat à ± 0.5 mm près (en toute rigueur il y a dans ce cas un intervalle de confiance de 100%), etc...

Si la variable suit une distribution normale, on repasse à l’incertitude type en divisant l’incertitude à 95% par 1.96. Si on ne connaît pas la distribution, on peut raisonnablement la diviser par 2.

On retiendra donc qu’on entre dans le logiciel des incertitudes types, obtenues en divisant par $\simeq 2$ les incertitudes élargies connues sur les X_i ou les Y_i .

Interprétation du χ^2 réduit

On définit $\chi^2_{\text{réduit}} = \chi^2 / (N - p)$, où p est le nombre de paramètres (2 pour une régression affine, 1 pour une régression linéaire), et χ^2 reste défini par l’équation 2.9.

Il s’agit d’un paramètre donné par les logiciels de traitement de données. La question est de savoir si oui ou non il est utile, et si oui, à partir de quelles valeurs on peut considérer un modèle validé.

Le plus important est de bien comprendre ce qu’il mesure. Vu sa définition, on peut dire que :

$$\chi^2_{\text{réduit}} \sim \frac{1}{\text{Nombre de points}} \frac{\text{écart entre le modèle et les points}}{\text{valeur de l'incertitude}}. \quad (2.10)$$

Autrement dit, il s’agit de la valeur moyenne de “l’écart entre le modèle et les mesures” / “l’incertitude associée à chaque mesure”.

Donc :

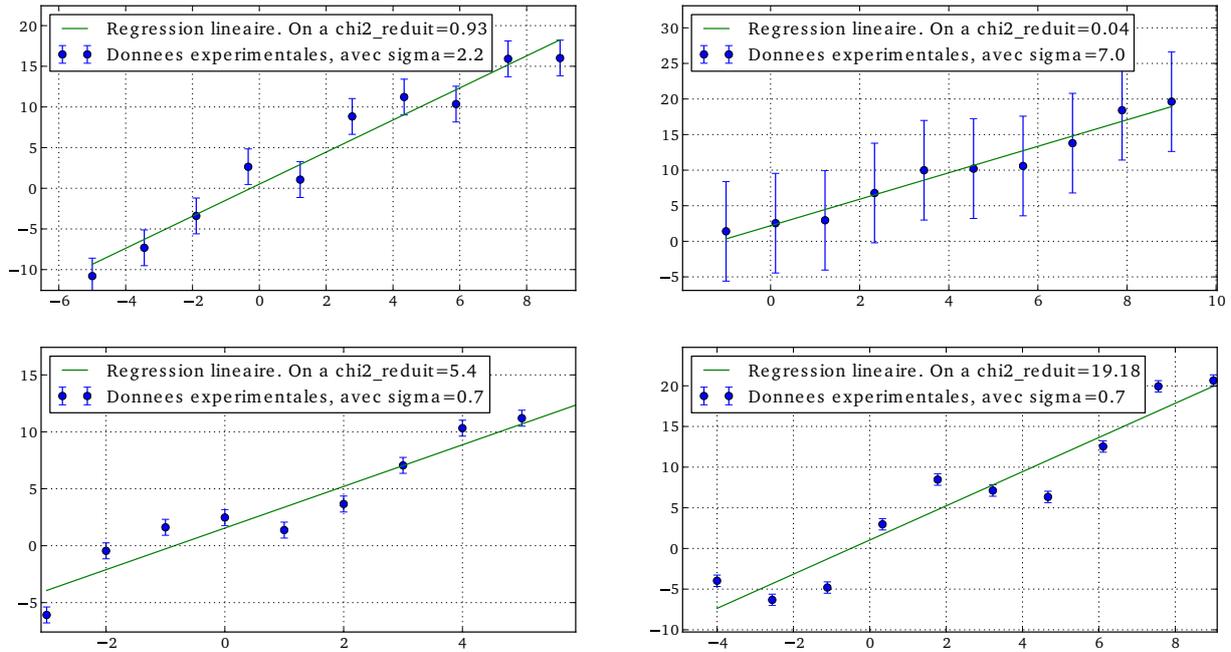


FIGURE 2.1 – Exemples de jeux de données avec régression linéaire et évaluation du $\chi_{\text{réduit}}^2$. Sauf en bas à droite, les données sont de la forme $y_i = 2x_i + 1 + w_i$ avec w_i un nombre aléatoire entre -3 et 3. En bas à droite, on a $y_i = 4 \sin x_i$. Sigma est l’incertitude rentrée pour les données.

- Si $\chi_{\text{réduit}}^2 \gg 1$, alors en moyenne l’écart point-droite est beaucoup plus grand que l’incertitude, et le modèle doit être rejeté. C’est le cas sur la figure 2.9 en bas.
- Si $\chi_{\text{réduit}}^2 \ll 1$, alors les incertitudes sont beaucoup plus grandes que la distance entre points et modèle. On peut conclure que le modèle est validé par l’expérience. Mais attention toutefois, il faut remarquer que l’expérience n’est pas très contraignante : certes, le modèle passe par les barres d’erreur, mais beaucoup d’autres modèles pourraient également passer ! C’est le cas sur la figure 2.9 en haut à droite.
- Si $\chi_{\text{réduit}}^2 \simeq 1$, alors le modèle passe par les barres d’erreur, mais les barres d’erreur ne sont pas trop grandes non plus. On peut alors conclure que l’accord est bon, et valider le modèle. Cette validation semble alors plus “satisfaisante” que dans le cas précédent où $\chi_{\text{réduit}}^2 \ll 1$. C’est le cas sur la figure 2.9 en haut à gauche, où on voit que la droite effleure les barres d’incertitude.

Une fois que l’on a compris ceci, on voit que la valeur du $\chi_{\text{réduit}}^2$ n’apporte en fait pas plus d’information qu’une inspection visuelle : on voit bien visuellement si le modèle passe par les barres d’erreur ou non, et si les barres d’erreur sont beaucoup plus grandes que l’écart point-modèle ou non. Une inspection visuelle permet, en plus, de voir clairement (surtout si le modèle est une droite) s’il y a une tendance ou des points aberrants (et d’autant plus si on trace les résidus). Il faut se souvenir que pour n’importe quel jeu de données et n’importe quel modèle *pris au hasard*, on peut toujours trouver des incertitudes qui font que $\chi_{\text{réduit}}^2 = 1$ (il suffit de prendre σ égal au $\chi_{\text{réduit}}^2$ calculé pour $\sigma = 1$...), voir par exemple figure 2.2.

On ne peut donc que conseiller de contrôler visuellement les résultats, de le dire, et *ensuite*, éventuellement, de commenter la valeur de $\chi_{\text{réduit}}^2$ (à condition de pouvoir expliquer ce qu’elle signifie).

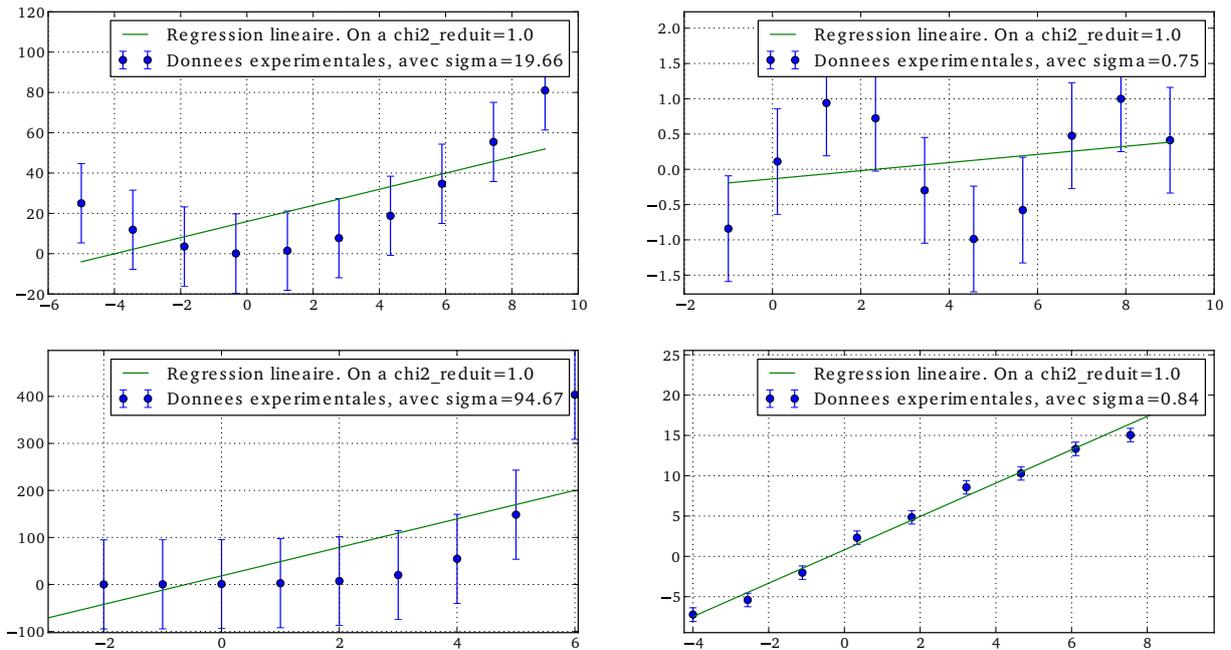


FIGURE 2.2 – Exemples de jeux de données avec régression linéaire et évaluation du $\chi_{\text{réduit}}^2$. Ici, σ est choisi pour avoir précisément $\chi_{\text{réduit}}^2 = 1$.

Comment interpréter les résultats lorsqu'on ne saisit pas les incertitudes sur les données ?

Il est possible de réaliser une régression linéaire sur un ensemble de points pour lesquels on n'a pas saisi d'incertitude. Le logiciel retourne néanmoins une valeur de $u(a)$, $u(b)$, et de χ_r^2 . Comment fait-il ?

- La recherche de a et b n'est pas impactée. Le programme minimise $\chi^2(a, b)$ en supposant les $u(y_i)$ tous égaux et les $u(x_i)$ nuls.
- Le programme suppose que $u(x_i) = 0$, et il estime l'incertitude type sur les y_i à l'aide de l'écart-type entre la loi linéaire et les données : pour tout i , $u(y_i) = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_i [Y_i - (aX_i + b)]^2}$. Il procède ensuite comme d'habitude.
- Le programme retourne parfois une valeur du χ^2 réduit, mais son interprétation n'est alors pas possible. Il ne faut pas le prendre en compte (voir paragraphe sur χ_r^2 : si l'incertitude expérimentale n'est pas connue on ne peut rien dire).
Le critère de modélisation correct ou non est alors avant tout visuel.

Faut-il imposer l'ordonnée à l'origine ?

Une question récurrente est de savoir s'il faut imposer l'ordonnée à l'origine lors d'une régression linéaire.

- Si le modèle ne le prévoit pas, alors évidemment non. Attention, il se peut que la théorie prévoit une ordonnée à l'origine nulle, mais que la prise en compte de contraintes expérimentales la rende non nulle (par exemple le temps de réponse d'un détecteur, une position d'un détecteur mal contrôlée, ...). Il faut alors le dire, et ainsi justifier un fit affine.
- Si au contraire le modèle prévoit une ordonnée à l'origine nulle, alors il faut (à mon avis) d'abord effectuer un fit affine en $y = ax + b$, et voir si oui ou non le 0 est dans les barres d'erreurs de b .

S'il ne l'est pas, c'est qu'un biais expérimental non pris en compte peut rendre $b \neq 0$, et on conserve donc un fit affine.

S'il l'est, alors on peut valider l'hypothèse d'un modèle linéaire et imposer $b = 0$.

Dans le cas où $b = 0$ est imposé, il faut toujours prendre garde à vérifier visuellement si cette contrainte est raisonnable (elle ne le sera pas si les données semblent clairement indiquer une pente autre de celle obtenue pour $b = 0$...).

Des éléments théoriques sur l'obtention des paramètres et de leur incertitude

- On détermine les paramètres a et b en minimisant la fonction

$$\chi^2(a, b) = \sum_i \frac{[Y_i - (aX_i + b)]^2}{a^2 u(X_i)^2 + u(Y_i)^2 + 2acov(X_i, Y_i)} \quad (2.11)$$

où les X_i, Y_i sont les points expérimentaux (les mesures), $u(X_i)$ et $u(Y_i)$ les incertitudes types associées à chaque point (X_i, Y_i) et $cov(X_i, Y_i)$ la covariance associée (qu'on prend à 0 en général car on la connaît rarement).

Dans le cas où les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale, avec ou sans corrélation, alors cette minimisation assure que la solution correspond au maximum de vraisemblance (voir gum_MC_reg_lin/html/principe.fr.html). Si ce n'est pas le cas, on minimise tout de même la même expression.

L'algorithme numérique utilisé pour effectuer la minimisation est par exemple celui de York (voir gum_MC_reg_lin/html/algo_york.fr.html).

- La quantité χ^2 définie ci-dessus peut être vue comme une variable aléatoire, car elle est définie en fonction des variables aléatoires (X_i, Y_i) .

On détermine ainsi l'incertitude type de χ^2 en utilisant sa définition et la formule de sommation des incertitudes types. On a donc facilement $u(\chi^2)$ dans le cas général.

Cependant, on n'a pas en général de moyen d'obtenir l'intervalle de confiance associé à $\pm u(\chi^2)$, ni d'obtenir le facteur d'élargissement à appliquer pour un intervalle de confiance donné.

C'est seulement dans le cas où les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale, que l'on connaît la distribution de probabilité de χ^2 et qu'on en déduit les intervalles de confiances voulus. **Reg Lin Mc** fournit tout ceci (cf aussi gum_MC_reg_lin/html/qualite_renormalisation.fr.html).

- On détermine les incertitudes types sur a et b : $u(a)$, $u(b)$, et $cov(a, b)$. Même méthode que pour χ^2 .

Le programme python retourne la matrice 2×2 de ligne 1 $u(a)^2, cov(a, b)$ et ligne 2 $cov(a, b), u(b)^2$. **Reg Lin Mc** fournit également ces résultats.

Ici aussi, c'est seulement si les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale que l'on peut en déduire l'intervalle de confiance associé à $\pm u(a)$ et $\pm u(b)$, ou obtenir un facteur d'élargissement pour un intervalle de confiance pour a et b . En effet dans ce cas, le facteur d'élargissement est donné par celui de la loi de Student à $N - 2$ degrés de liberté (N est le nombre de couples de points (X_i, Y_i) sur lesquels on effectue la régression).

Reg Lin Mc fournit ainsi différentes valeurs pour différents intervalles de confiance. Régressi fournit l'incertitude élargie à 95% seulement. Le programme python fournit celle à 95% (ou à ce que l'on veut si on change la variable level).

La figure 2.3 donne le facteur d'élargissement pour différents niveaux de confiance.

- On peut aller plus loin en prenant en compte le fait que a et b sont corrélés (en général si on prend une ordonnée à l'origine importante on a plutôt une pente plus faible, et vice versa).

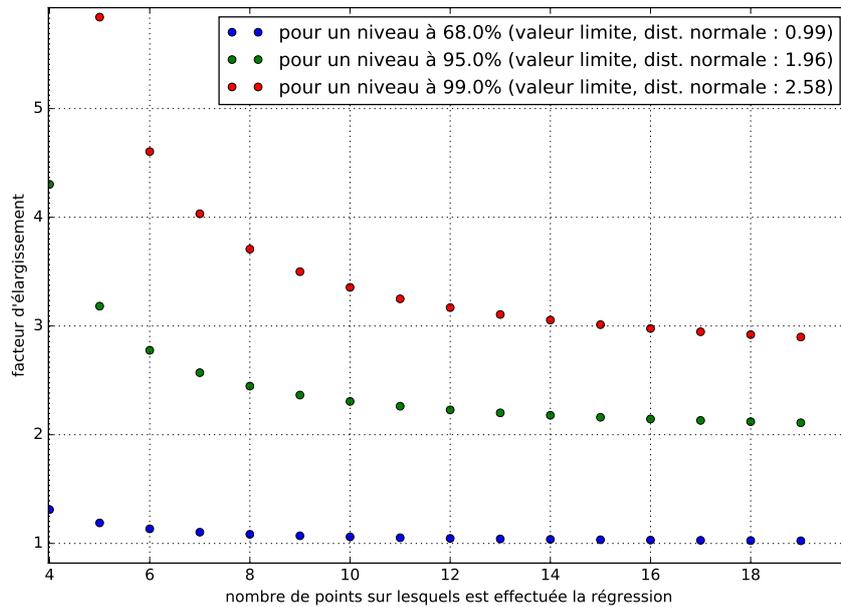


FIGURE 2.3 – Facteur d'élargissement, par lequel multiplier l'incertitude type $u(a)$ ou $u(b)$ sur les paramètres a et b afin d'obtenir l'incertitude élargie correspondant à un niveau de confiance de 68%, 95% ou 99%.

Ceci est dans l'hypothèse (toujours effectuée) où les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale. On peut retenir que pour un niveau à 95% le facteur est de 4, 3 ou 2.5 pour 4, 5 ou 6 points, puis entre 2.5 et 2 ensuite.

On voit également que l'intervalle $\pm u(a)$ donne quasiment toujours une confiance à 68% (car le facteur est proche de 1 partout pour ce niveau).

- Reg Lin Mc permet donc de tracer les ellipses de confiance (gum_MC_reg_lin/html/ellipse_iso_densite_student_ab.fr.html) pour a et b , qui sont des surfaces telles qu'il y ait 95% (par exemple) des couples (a, b) . Si l'ellipse est inclinée c'est qu'il y a corrélation entre a et b . Ces ellipses sont tracées en supposant que les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale.
- Enfin on peut, une fois a et b connus, obtenir y pour une valeur de x donnée par la relation $y = ax + b$. L'incertitude type sur ce y est alors $u(y)^2 = u(b)^2 + x^2u(a)^2 + u(x)^2a^2 + 2xcov(a, b)$.
- Si on suppose que les couples (X_i, Y_i) suivent une loi binormale, alors on peut en déduire des intervalles de confiance avec un facteur d'élargissement de loi de Student à $N - 2$ degrés de liberté. (Voir gum_MC_reg_lin/html/prevision.fr.html, et gum_MC_reg_lin/html/prevision_x_y.fr.html).
- On peut faire la même chose si l'on souhaite calculer x pour une valeur de y donnée.
- On peut aussi tracer une ellipse de confiance autour du point (x_i, y_i) : gum_MC_reg_lin/html/ellipse_iso_densite_normale.fr.html

Évidemment, on peut aussi faire des simulations Monte Carlo, et retrouver les ellipses de confiance pour a et b . Il faut bien sûr se donner une distribution de probabilité pour les couples (X_i, Y_i) . Reg Lin Mc le propose, en supposant cette distribution gaussienne : gum_MC_reg_lin/html/principe_monte_carlo.fr.html.

Chapitre 3

Mécanique, mécanique des fluides

LP 1 – Contact entre solides, frottements

Jury :

La loi d'Amontons est importante. Distinguer statique et dynamique. Deux lois de Coulomb : condition de non glissement, et force en dynamique. Parler énergétique. Ne pas confondre puissance sur le système total et puissance sur un des solides : l'illustrer sur un exemple simple. Esquisser une interprétation microscopique. Il serait intéressant de développer un exemple où intervient du roulement avec et sans glissement.

Plan

Bibliographie :

- **Augier**, Tec&Doc MP : structure la leçon.
- **BFR** mécanique 2 : bons compléments.
- **Andreotti**, les milieux granulaires : lois de Coulomb et Amontons, interprétation microscopique.
- Perez pour des images de vis.
- Sanz PC : stick-slip bien fait.
- **Handbook** ou Hecht Physique : valeurs de coefficients de frottement.

Manips :

- Le plan incliné (et dire qu'en préparation on a mesuré tels angles).
- La règle de Sommerfeld.
- Stick-slip.

Niveau L2, pré-requis :

- Mécanique du solide.

Introduction

Importance dans la vie de tous les jours.

Exemples concrets :

- OG pour les pneus sur route mouillée ou non (voir Hecht).
- La boîte à vitesses (embrayage).
- Les vis (arc boutement, Perez dis qqchose la dessus).

- Les voûtes (idem).
- Le lasso (force tangentielle exponentielle en la longueur, on peut faire le calcul).
- Construction de la pyramide de Khéops (cf Hachette TS).

I - Contact entre deux solides : éléments de description

Suivre le Tec&Doc MP (Augier).

1 Éléments cinématiques

Points I_1, I_2, I , vitesse de glissement.

2 Action de contact

On suppose le contact ponctuel. On considérera ensuite des exemples où ce n'est clairement pas le cas, mais ça marche quand même.

Résultante des forces : R et T . Directions. Moment en I nul car ponctuel.

II - Lois du frottement : Amontons et Coulomb

Suivre le Tec&Doc MP (Augier).

1 Énoncé des lois (Andreotti)

2 Conséquences : cartons du déménageur (les empiler ou pas revient au même), cône de frottement, arc-boutement (les vis, Perez), hystérésis (l'expérience de Sommerfeld), ...

3 Origine microscopique, Andreotti.

Aire de la surface de contact \ll aire macroscopique : $S_r = N/\sigma$ avec σ la contrainte, qui est constante car l'appui va jusqu'à la déformation plastique. Et la force tangentielle est $T = \sigma_{ij} S_r = \sigma_{ij}/\sigma \times N$.

4 Aspect énergétique

Puissance des forces de frottement sur S_1 , sur S_2 , et inter-système. Cas du sol immobile.

Exos sur l'entraînement par rotation (comme une boîte à vitesse). Cas du roulement sans glissement : $P = 0$.

III - Exemples de mouvements

1 Stick-slip : suivre le Tec&Doc ou le Sanz.

Application : crissement de craie, tremblement de Terre (Andreotti).

2 Cylindre roulant sur un plan incliné : si temps.

Conclusion et ouverture

Un domaine de recherche encore actif (tribologie).

Remarques

Frottement de pivotement et de roulement

Voir BFR mécanique 2, et https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_au_roulement. On n'en parle pas.

Pour mettre en mouvement une roue posée sur le sol horizontal avec un contact ponctuel, il faut exercer un couple M_t supérieur à une certaine limite : il y a roulement si et seulement si

$M_t/N < \delta$, où δ est un coefficient de roulement statique et N la composante verticale des forces s'exerçant sur l'objet (le poids).

Lorsqu'il y a roulement, on a $M_t/N = \delta_c < \delta$. On voit donc que la puissance de cette action n'est pas nulle, et que la roue lancée librement finit par s'arrêter.

Point d'application de la résultante

Il s'obtient en écrivant le TMC appliqué au centre de masse (cf Augier Tec&Doc MP). Dans le cas particulier où il n'y a que la gravité, on a alors que le moment en G de la résultante $\mathbf{R} = \mathbf{T} + \mathbf{N}$ est nul. Le point d'application de la résultante est donc à la verticale (par rapport à la pesanteur) de G . (Ce n'est donc pas le centre géométrique de la surface de contact.)

Interprétation microscopique

Exemple de la brosse ou des cils pour expliquer l'origine de l'hystérésis.

Insister sur le fait que c'est indépendant de la surface (macroscopique) de contact (loi de Coulomb-Amontons), mais dépend seulement de la force normale, parce que changer la surface macroscopique ne change pas la surface microscopique de contact.

En effet, l'interprétation microscopique est la suivante (cf Hecht et Andreotti) : le frottement est dû à des interactions entre les particules qui "dépassent" de la surface de chaque solide, et la force de frottement est proportionnelle au nombre de liaisons inter-atomiques entre les deux solides, et donc à la surface *microscopique* de contact, et seulement à cette surface (par exemple la façon dont on appuie ne change pas la force des liaisons inter-atomiques). Deux conséquences :

- Quand on appuie ou si la masse du solide augmente, on augmente cette surface microscopique, donc la force de frottement augmente.
- Prenons un objet de masse m qu'on garde constante. Il présente une surface (macroscopique) de contact S , et il y aura une certaine surface microscopique de contact. Si on divise S par deux, la force par unité de surface augmente, et donc l'interpénétration des matériaux aussi, et la surface microscopique de contact par unité de surface macroscopique augmente, si bien que la surface microscopique de contact reste identique, et donc aussi la force de frottement.

Limites des lois de Coulomb

On observe en fait que le coefficient de frottement dynamique μ_d varie avec la vitesse : il diminue si v_g augmente.

De plus, on n'a plus proportionnalité entre T et N aux fortes charges, car alors la surface de contact est égale à la surface totale de l'objet et ne peut plus augmenter.

On observe aussi qu'avec le temps, μ_s augmente.

La règle de Sommerfeld

Quand on avance avec glissement un doigt, il se rapproche du centre de masse de la barre et supporte de plus en plus de poids, si bien que N devient trop grand et le glissement s'arrête (à savoir mettre en équation tout de même...).

En thermodynamique

C'est compliqué.

Voir par ex. Dettwiller (BUP 775 et BUP 775(2)). Il explique entre autre que le frottement solide est irréversible à cause de $\mu_s \neq \mu_d$, quelle que soit la lenteur à laquelle il a lieu. (Contrairement à un frottement visqueux, ou à de l'effet Joule, qui peuvent être réversibles à la limite des vitesses ou courants très faibles.)

LP 2 – Caractère non galiléen du référentiel terrestre

Jury :

Estimer des ordres de grandeur. Définir les référentiels. Exemples pertinents, pouvant être avec des fluides. Pesanteur et verticale. Conditions dans lesquelles on peut négliger le caractère non galiléen.

Plan

Bibliographie :

- Brasselet Mécanique PCSI MPSI.
- Portelli, La physique par la pratique.
- Tec&Doc PC nouveau programme : vents géostrophiques.
- Carpentier, La physique en applications : exo sur la déviation vers l'est, avec les données de l'expérience.

Manips :

- On peut tenter le pendule de Foucault sur une table tournante...

Niveau L2, pré-requis :

- Mécanique newtonienne.
- Changements de référentiels non galiléens.
- Mécanique des fluides.

Introduction

(Brasselet) On a vu les changements de référentiels, les forces d'inertie d'entraînement et de Coriolis. Pour travailler dans un référentiel non galiléen, il est plus simple de faire intervenir ces forces (plutôt que de travailler dans un référentiel galiléen absolu).

(re-)Définir référentiel galiléen : les lois de Newton s'y appliquent, en particulier un objet isolé va en ligne droite (ou reste immobile).

Définir un référentiel terrestre : référentiel lié à la Terre. N'a aucune raison d'être galiléen.

But : montrer pourquoi, montrer les effets, montrer quand il peut l'être. C'est aussi une bonne occasion de faire passer le message : un effet n'est jamais négligeable tout court, il l'est toujours sous certaines conditions.

I - Différents référentiels

Voir Portelli pour les définitions.

1 Référentiel de Copernic : centré sur le centre de masse du système solaire, axes pointant vers des étoiles fixes. (Rq : il y a aussi le référentiel héliocentrique centré sur le Soleil.) On le suppose galiléen dans la suite.

2 Référentiel géocentrique : centré sur le centre de masse de la Terre, axes parallèles à ceux du référentiel de Copernic. (Rq : pas de force de Coriolis car il est en translation circulaire par rapport au précédent.)

3 Référentiel terrestre : lié à la Terre.

On va d'abord étudier les effets mettant en évidence le caractère non galiléen du référentiel géocentrique, et ensuite du référentiel terrestre.

II - Caractère non galiléen du référentiel géocentrique

Suivre Brasselet pour la démarche, Portelli pour des précisions.

1 Mouvement de la Terre dans le référentiel de Copernic

Sous l'action des attractions gravitationnelles des autres astres. OG.

2 Le PFD appliqué dans le référentiel géocentrique

Mise en évidence du terme de marée. OG.

3 Conséquence : les marées océaniques

Détailler les marées océaniques.

Évoquer la théorie dynamique (nécessaire pour expliquer les observations d'élévations de plusieurs mètres, les temps de retard, ...).

Il y a aussi des marées terrestres (quelques dizaines de cm, contre de l'ordre de 1 m pour les océaniques (dans la théorie statique)). Évoquer les frottements, la synchronisation des révolutions/rotations, l'éloignement de la Lune. Évoquer la limite de Roche.

Donner des conditions d'applicabilité de $R_{\text{géo}}$ galiléen ?

III - Caractère non galiléen du référentiel terrestre

1 Jour sidéral, jour solaire moyen, vecteur rotation

2 Le PFD appliqué dans le référentiel terrestre

OG, donner des conditions pour les négliger comme dans Brasselet.

Puis définir la pesanteur et la verticale locale.

3 Force de Coriolis

OG comme dans le Brasselet : il faut des expériences assez courtes. Exemple de la déviation vers l'est, et du pendule de Foucault, confirmer dans chaque cas que si l'expérience dure assez peu de temps, on n'a pas d'effet.

4 Vents géostrophiques

D'abord avec les mains et la force de Coriolis. Ensuite écrire Navier-Stokes, introduire le nombre de Rossby, faire les approximations nécessaires.

Conclusion et ouverture

Relativité générale.

Remarques

Marées

La théorie statique des marées océaniques applique l'équation de l'hydrostatique à l'eau (elle ne s'applique donc pas aux marées terrestres, pour lesquels il y a existence de contraintes (donc on trouvera pour la terre des élévations plus faibles)). L'étude est faite dans le référentiel terrestre, et la pesanteur inclut déjà le terme d'inertie d'entraînement (et le terme de Coriolis est nul car $v = 0$). Elle prévoit une hauteur maximale de 80 cm.

La composante de la "force de marée" qui contribue n'est pas la composante verticale (la variation relative de pesanteur est infime), mais la composante horizontale, qui tire librement (aux frottements près) l'eau pour l'enlever de certains endroits et l'accumuler à d'autres.

De plus, pour que le niveau d'eau augmente quelque part, il faut un apport d'eau venant d'ailleurs, ce qui peut se faire lentement (le temps de réponse de l'océan n'est pas $\ll 12$ h).

Enfin, il peut y avoir des résonances si le temps caractéristique local de la baie est de l'ordre de 12 h. (Brasselet, Portelli)

Questions diverses

- Écart entre centre de masse du système solaire et centre du Soleil ?
800 000 km si l'on ne compte que Jupiter, à comparer à $R_{\odot} = 700\,000$ km.
- Les planètes tournent-elles autour du centre de masse du système solaire ou autour du Soleil ?
Ni l'un ni l'autre. Il faut d'abord dire ce que signifie "tourne autour" : on entend ici "décrire une ellipse dont un des foyers est le point considéré". Considérons pour simplifier le système Terre-Soleil-Jupiter. Il s'agit d'un système à trois corps, et la trajectoire de la Terre n'est pas une ellipse.
Et en général, ce n'est pas parce qu'il y a un centre de masse que la Terre doit tourner autour. Si on considère deux soleils orbitant l'un autour de l'autre à une distance de 0.2 UA, et la Terre tournant autour à 1 UA, alors vus de la Terre les deux soleils ne sont absolument pas équivalents à un astre de masse $2M_{\odot}$ situé au centre de masse ! De même, la Lune ne tourne pas autour du centre de masse Terre-Lune-Soleil. La réponse à la question initiale est donc plutôt : autour du Soleil, et c'est perturbé par Jupiter.
- Attention à la démonstration du jour sidéral.
- Connaître R_{\odot} , M_{\odot} , R_T , M_T , 1UA, $D_{\text{Terre-Lune}}$, l'ordre des planètes, au moins.
- Interaction gravitationnelle de l'ordre de l'interaction électrostatique pour un corps de l'ordre de 1000 km.
- On peut dire que lorsque la durée de l'expérience est petite devant la période de rotation du référentiel géocentrique autour du soleil (un an), alors on peut dire que celui-ci est galiléen (la trajectoire du référentiel est quasiment rectiligne sur une courte durée).
Idem pour une durée courte devant une journée dans le cas du référentiel terrestre.

LP 3 – Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopique et microscopique

Jury :

Se renseigner sur les performances des gyroscopes modernes. Énoncer clairement les approximations, les vérifier sur les exemples présentés. Écrire l'équation de précession. Consacrer du temps au domaine microscopique. Équations d'évolution à établir dans le ref tournant, les conditions de résonance et les applications doivent être évoquées. Gyroscopique si $B_0 \gg B_1$ dans le cas du moment orbitaire (en fait pas complètement, cf remarques).

Plan

Bibliographie :

- **Perez**, Mécanique : la démarche est claire.
- Boutigny, Mécanique ; BFR, Mécanique : bons compléments.
- Cap Prépa ou Tout en un Sanz, PC.
- **Cagnac**, Physique atomique : pour l'aspect microscopique.

Manips :

- Gyroscopie, toupie, roue de vélo sur chaise tournante.

Niveau L2, pré-requis :

- Théorème du moment cinétique, matrice d'inertie.
- Angles d'Euler et les projections associées.
- Magnétisme dans la matière.

Introduction

Lancer le gyroscope : c'est très stable, ça garde la même direction. Appuyer dessus : ça tourne dans une direction perpendiculaire.

But : expliquer tout ceci. On va devoir faire des approximations en partant d'un problème complexe : la démarche est intéressante.

On verra des applications, et on verra qu'une physique parfois analogue se retrouve aux échelles microscopiques.

I - L'approximation gyroscopique

1 Description du problème

On considère un objet à symétrie de révolution : matrice d'inertie avec I_1, I_1, I_3 . Problème : la matrice d'inertie est connue dans le référentiel de la toupie seulement, ou dans le référentiel de Resal car symétrie de révolution : il faut donc s'y ramener.

Mise en équation avec une force \mathbf{F} quelconque. Aboutir aux équations d'Euler (en allant très vite, s'appuyer sur les pré-requis, avec la démarche de Perez).

On peut résoudre le problème si $\mathbf{F} = 0$ (cas du gyroscope équilibré, mouvement de Poincaré), et dire des choses si $\mathbf{F} \neq 0$ (en trouvant des intégrales premières), mais c'est alors bien compliqué.

Il va falloir faire des approximations !

2 L'approximation gyroscopique

Bien faire l'approximation sur le moment cinétique (et pas seulement sur les vitesses de

rotation).

Interprétation énergétique, couple, ... (BFR méca 2).

Écrire les équations sous la forme $d\sigma/dt = A \wedge \sigma$ (pour pouvoir faire l'analogie avec le microscopique plus tard).

Résoudre ou pas cette équation (on peut dire qu'on l'a vu dans le cadre du mouvement d'un électron dans un champ \mathbf{B}).

Perez utilise une approche bien simple, sans passer par les équations d'Euler. Possible.

Justifier l'approximation sur le gyroscope de la manip (OG).

3 Cas de la toupie (si temps, donc non a priori)

Les frottements font que θ n'est pas constant. En fait, la toupie inclinée ne touche pas le sol en O, mais en A légèrement décalé. Les frottements s'opposant à la rotation induisent un couple qui est presque selon l'axe de la toupie, et qui apparaissent dans le terme $d\theta/dt$.

Important : il n'y a pas nutation seulement dans l'approximation gyroscopique sans frottements : dans l'approximation gyroscopique, s'il y a des frottements, on a nutation.

Manip : chaise tournante (on fera l'analogie plus tard avec Einstein de Haas). Montre que pour sortir de l'approximation, il faut exercer un couple important, si bien que la personne sur la chaise est mise en rotation.

II - Applications macroscopiques

Dans l'approximation gyroscopique, le système est très stable, car pour en sortir il faut exercer un couple important. On peut se servir de cette propriété.

1 Horizons artificiels dans les avions

Mettre le gyroscope sur un tabouret et le faire tourner (ou le promener à la main).

2 Précession des équinoxes, Perez. Justifier l'approximation (OG).

III - Effets microscopiques

On exploite ce que l'on vient de faire sur un système a priori différent. On va voir qu'il y a en fait des analogies, qui vont nous permettre de mieux le comprendre...

1 Lien entre moment magnétique et moment cinétique : $\mathbf{M} = \gamma \mathbf{S}$

2 Précession de Larmor dans un champ B_0

Écrire les équations sous la forme $d\sigma/dt = A \wedge \sigma$. C'est pareil : donc on sait que ça précesse.

Rq : on n'utilise pas l'approximation gyroscopique. Dans le cas du lien moment magnétique - moment cinétique orbital, il faut l'hypothèse que le champ B varie doucement devant la période de révolution de l'électron pour que le traitement soit valable. Dans le cas du moment cinétique de spin, le lien magnétique - cinétique est instantané et ne requiert pas d'hypothèses.

3 Expérience d'Einstein et de Haas (ou juste à mentionner)

C'est exactement comme pour la chaise avec la roue de vélo : on place un échantillon dans un champ B , on inverse B , et ceci met en rotation l'échantillon. Voir Cagnac. (Il existe l'expérience complémentaire où mettre en rotation l'échantillon provoque une aimantation, mais c'est compliqué à expliquer.)

Résultats importants : prouve une proportionnalité entre M et L pour chaque atome, avec un $\gamma < 0$. Mais la valeur de γ n'est pas en accord avec le point de vue semi-classique (moment orbitalaire de l'électron), il y a un facteur 2, qui s'expliquera par le spin.

4 Ajout d'un champ tournant et résonance

Se placer dans le référentiel tournant.

Montrer que si $\delta\omega = 0$, alors pour un atome M_z bascule. Dans le cas d'un échantillon macroscopique, cela veut dire que l'aimantation totale sera le plus perturbée précisément à cette fréquence ω_0 . En chimie, B_0 est en fait celui ressenti par l'atome d'hydrogène (le proton), et dépend de l'environnement. On peut donc en déduire le B ressenti en regardant à quel ω a lieu la résonance.

En vrai, il y a aussi de la relaxation. Sans B_1 , le moment macroscopique de l'échantillon s'aligne avec B_0 . On peut montrer (Cagnac) que cette aimantation n'est plus selon B_0 lorsque B_1 est à la résonance : ceci peut être mesuré expérimentalement. De plus, l'échantillon absorbe un maximum d'énergie à la résonance. La mesure se fait avec des bobines, car M de l'échantillon y induit un flux.

Après un vrai appareil de RMN ne marche pas vraiment comme ça : on envoie toutes les fréquences d'un coup, et on fait une FFT de la réponse transitoire lorsqu'on coupe le champ B_1 . Cette réponse transitoire ayant lieu à la fréquence propre $\propto B_0$, elle renseigne sur B_0 . Voir aussi p. 206.

Parler chimie, IRM...

Conclusion et ouverture

Parler de ce qu'on n'a pas eu le temps d'aborder.

Remarques

La leçon envisagée ici est probablement beaucoup trop longue. Il faut raccourcir.

Définitions des mouvements

Gyroscope : solide de révolution tournant autour de son axe, vite, suspendu en son centre de masse de façon parfaite (ainsi : pas de moments, pas même celui du poids). C'est un mouvement de Poinsot (il est pseudo-isolé).

Mouvement de Poinsot : solide de révolution en mouvement autour d'un point O , moment en O nul ($\rightarrow E_c$ et σ constants). Dans un champ de gravité, O est donc le centre de masse G .
Ex : ballon de rugby dans son référentiel de centre de masse.

Mouvement de Lagrange et Poisson : idem Poinsot, mais il y a un moment dont l'action en O est selon la ligne des nœuds.
Ex : la Terre, une toupie (O est alors le point de contact, et il y a en O le moment du poids).

Applications macroscopiques

Dans l'approximation gyroscopique, le système est très stable car pour en sortir, il faut exercer un couple important (c'est en fait son inertie qui est grande).

Balles de fusil, ballon de rugby (OG).

Gyroscope dans les avions pour connaître le cap : toujours présent dans certains, mais aujourd'hui remplacés par des gyroscopes optiques qui fonctionnent via l'effet Sagnac (voir Taillet, Optique physique) : on fait interférer deux ondes parcourant deux bras en fibre optique d'un même cercle, et il y a un déphasage proportionnel à la vitesse de rotation du dispositif, qui, si on l'intègre, permet de remonter à l'angle absolu.

Un horizon artificiel est différent d'un capteur d'accélération angulaire. Pour l'horizon, on garde le gyroscope libre et on mesure sa position ; pour le capteur d'accélération le gyroscope est

maintenu fixé et on mesure le couple gyroscopique.

Gyroscope dans la station spatiale internationale : quatre gyroscopes sont utilisés pour orienter l'ISS.

Gyroscope pour stabiliser les sondes spatiales : sur Rosetta par exemple.

LP 4 – Lois de conservation en dynamique

Plan

Bibliographie :

- **Brasselet**, mécanique PCSI-MPSI : les théorèmes de base en mécanique des systèmes, les chocs.
- **Sivardière**, La symétrie en mathématique, physique et chimie : lien invariance/conservation, et problème de Kepler avec Runge-Lenz.
- **Hecht**, physique : exemples sympathiques.
- **Cagnac** : explications de l'expérience de Compton.
- **Langlois**, relativité : calcul malin de l'effet Compton.
- Panorama de la physique : OG pour le pulsar.
- Salamito, Tout en Un PCSI 2013 : au cas où.

Manips :

- Pendule de Newton.

Niveau L3, pré-requis :

- Mécanique du point, des systèmes et du solide.
- Relativité restreinte.

Attention : on jongle entre mécanique du point et mécanique des systèmes, et il faut être très clair la dessus.

Introduction

On a vu la mécanique du point, des systèmes et du solide, et les lois associées : principalement le PFD, le TMC, le TEC. Cette leçon a deux buts principaux :

- Relire les lois de la dynamique sous l'angle des quantités conservées, en mettant en évidence leur puissance pour résoudre simplement des problèmes.
- Lier la conservation de quantités à la structure du potentiel, permettant ainsi une compréhension plus fine des lois de la dynamique.

Dans la partie I, on passe en revue les principales lois de conservation. On les illustre par des exemples simples de mécanique des systèmes. Dans cette même partie, on lie les quantités conservées à des invariances du potentiel pour le cas particulier d'un point matériel (le cas des systèmes étant plus compliqué...).

Dans les parties II et III, on utilise les quantités conservées pour résoudre "simplement" le problème Képlerien et un problème de collisions.

I - Les différentes lois de conservation – liens avec les invariances du système

Brasselet pour les théorèmes (ou un livre de prépa), Hecht et autres pour les exemples, Sivardière pour le lien avec l'invariance du potentiel.

1 Conservation de l'impulsion

- Énoncé dans le cas d'un système.
- Ex. de la fusée, du canon, du nageur.
- Pour une particule ponctuelle : lien avec l'invariance par translation du potentiel.

2 Conservation de l'énergie

- a) Énoncé dans le cas d'un système.
- b) Pendule de Newton.
- c) Pour une particule ponctuelle : lien avec l'invariance temporelle du potentiel.

3 Conservation du moment cinétique

- a) Énoncé dans le cas d'un système.
- b) Ex. du tabouret où on écarte les bras, du pulsar.
- c) Pour une particule ponctuelle : lien avec l'invariance par rotation du potentiel.

Rq : Dans le lien avec les symétries du potentiel, il faut que le potentiel existe : il existe par ailleurs des systèmes invariants n'admettant pas de potentiel. D'autre part, on remarque que le potentiel est souvent moins symétrique que le système lui-même, et c'est alors souvent la symétrie du potentiel qui compte (par exemple un champ de pesanteur \mathbf{g} uniforme est homogène, mais pas le potentiel, qui est mgz , ne l'est pas, donc p_z n'est pas conservé).

II - Application au mouvement Képlerien

Brasselet, Sivardière (au chapitre Symétries Dynamiques).

1 Le problème

2 Loi des aires : potentiel invariant par rotation, donc L conservé.

3 Énergie potentielle effective et types de trajectoires : potentiel invariant dans le temps, donc E conservé. Conséquences.

4 Le vecteur de Runge-Lenz : encore un invariant.

III - Application aux collisions : effet Compton

Cagnac, Langlois.

Idée : description d'un phénomène à l'aide de lois de conservation (énergie et impulsion ici). On y arrive même sans connaître le détail de l'interaction, pourvu qu'on la suppose d'une portée finie.

Le détail de l'interaction donne en fait l'expression de la section efficace de diffusion (celle de Thomson ici sans corrections relativistes).

Utiliser l'invariant $p_1 \cdot 2$ (produit scalaire) entre les différents référentiels.

Remarques :

- Faire remarquer que la collision de deux billes à 2D est similaire : on n'arrive pas non plus à connaître l'angle de diffusion sans s'intéresser au détail de la collision (forme et rayon des boules, etc...). En effet : à 2D on a 4 inconnues ($v_{x1}, v_{y1}, v_{x2}, v_{y2}$), et trois équations : conservation de l'énergie et de l'impulsion. Il faut se donner l'angle de diffusion. A 3D idem : 6 inconnues et 4 équations : il faut se donner deux angles de diffusion.
- C'est pareil à 1D avec plus de deux billes : pour N billes, N inconnues et 2 équations (impulsion totale, énergie totale). Cf le pendule de Newton : ça ne donne pas la même chose avec des balles de ping pong ou des billes d'acier, c'est donc que le détail des interactions importe.

Conclusion et ouverture

La prédiction de l'existence du neutrino par Fermi. Le théorème de Noether.

Remarques

Indépendance ou équivalence du RFD, TEC, TMC

Les conservations de l'énergie, de l'impulsion, et du moment cinétique entre des instants initiaux et finaux donnent en général, pour un *système* de points, des relations indépendantes.

Prenons le cas du TEC. Pour le démontrer, il s'agit d'appliquer le principe fondamental de la dynamique à chaque particule, et de montrer que la somme des $m_i v_i^2$ se conserve. Pour le RFD, on montre de même que c'est la somme des $m_i v_i$ qui se conserve. C'est donc en quelque sorte l'expression de moments de la fonction de distribution : invariance du premier moment pour le RFD, du deuxième pour le TEC. Ce ne sont donc pas des informations équivalentes.

Regardons maintenant le TMC. Pour un système de points, le TMC se déduit du principe fondamental de la dynamique + principe d'actions réciproques. Comme on ne se sert, en général, jamais du principe des actions réciproques (lourd), le TMC fournit bien des relations indépendantes du RFD.

Potentiel pour un système de particules et lien entre ses invariances et les quantités conservées

On a fait le lien entre symétrie du potentiel et conservations pour un point matériel. Peut-on faire de même avec un système de points ?

Dans le cas du TMC et du RFD, les actions intérieures s'annulent, donc seules les forces extérieures interviennent. Les conditions sont alors les mêmes que pour un seul point : il faut que F_{ext} dérive d'un potentiel homogène (si on veut que l'impulsion totale se conserve) ou isotrope (si on veut la conservation du moment cinétique total).

Pour l'énergie et l'invariance dans le temps, les forces intérieures interviennent. Ça fonctionne si les forces intérieures dérivent d'un potentiel qui ne dépend pas explicitement du temps. C'est le cas d'interactions à deux corps de type $u(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$. Voir épreuve A (année ?).

Pendule pesant avec frottements

On ne peut pas trouver de potentiel.

Pendule de Newton

Lorsque l'on démontre qu'il y a autant de billes qui repartent que de billes qui arrivent, on fait deux hypothèses (motivées par ce qu'on observe) assez fortes : les billes qui impactent la chaîne de billes restent sur place (leur vitesse tombe à 0), et les billes qui décollent de l'autre côté le font toutes ensemble avec la même vitesse. Or, les billes impactant la chaîne pourraient rebondir et repartir légèrement en arrière, et celles qui décollent pourraient le faire avec des vitesses différentes...

Il se trouve que les propriétés particulières des billes métalliques et de leur interaction de contact (force proportionnelle à la pénétration puissance $3/2$) autorisent la propagation d'un soliton. Considérons l'impact d'une seule bille. L'énergie fournie lors de l'impact se propage dans la chaîne sous la forme d'un paquet d'onde qui ne se déforme pas (le soliton), et qui, arrivé en bout de chaîne, transmet toute son énergie et impulsion à la dernière bille, qui décolle. Il n'y a ainsi aucune réflexion lors du passage du soliton d'une bille à l'autre. Ce ne serait pas le cas avec, par exemple, des balles de ping-pong : l'énergie fournie par l'impact serait transmise en partie à

la seconde balle, en partie réfléchi à nouveau vers la première balle, qui rebondirait en arrière, idem entre la seconde et la troisième balle, etc...

Dans le cas de l'impact de deux billes, il y a un double soliton qui se propage, qui arrive en bout de chaîne et fait partir la dernière et l'avant dernière bille. Il se trouve que la vitesse de propagation du soliton croît avec son amplitude. La dernière bille part donc légèrement avant l'avant-dernière, ce qui commence à dérégler le pendule : même sans dissipation, le mouvement finira par s'écarter de ce qu'on attend.

Autres exemples

Mouvement cyclotron et vecteur de Landau. Exercice sur le système d'étoiles double Sirius dans le cap prépa première année.

Symétries des lois de la physique, droite et gauche

Voir le cours de Feynman, §52. Discute le fait que l'interaction faible permet de distinguer droite et gauche.

Les interactions forte, gravitationnelle, et électromagnétique, sont invariantes par symétrie droite/gauche (ou de réflexion dans un miroir). C'est-à-dire que si l'on construit une montre, et qu'on construit une deuxième montre identique à l'image de la première dans un miroir, elles battront à la même vitesse.

Cependant, l'interaction faible ne possède pas cette symétrie. On peut faire des expériences où des noyaux de cobalt se désintègrent (via interaction faible) dans un champ magnétique \mathbf{B} , et on constate que la majorité des électrons ainsi produits se déplacent dans la direction de \mathbf{B} . Cela signifie que si l'on considère l'expérience (fictive) miroir, \mathbf{B} est inchangé (vecteur axial), et donc les atomes devraient aller dans l'autre direction ! Ceci n'est pas possible, et signifie que ce phénomène permet de donner un sens absolu à \mathbf{B} , et ainsi une vraie définition de droite et gauche.

Si on reprend l'exemple des montres, cela veut dire qu'on peut construire une montre dans laquelle il y a des noyaux de cobalt qui se désintègrent dans un champ \mathbf{B} . On compte combien vont vers le bas, et on fait avancer l'aiguille en proportion. Alors la même montre miroir n'ira pas au même rythme, car les atomes partiront cette fois plus vers le haut.

Viens ensuite la symétrie matière/anti-matière. Il se trouve qu'en fait, la "montre droite" précédente donnerait la même heure que l'anti "montre gauche", et la "montre gauche" la même heure que l'anti "montre droite". Au final, on ne peut donc pas vraiment distinguer droite de gauche...

Symétries, remarques de l'article du BUP de Sivardière

Principe de Curie (1894) : "Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. La réciproque n'est pas vraie, c'est-à-dire que les effets produits peuvent être plus symétriques que les causes."

Curie montre également (en cristallographie) qu'un effet n'est possible que dans un milieu de symétrie basse, car les symétries interdisent les effets. Par exemple interdisent la biréfringence ou le pouvoir rotatoire. On peut ainsi, en fonction des effets constatés, exclure certaines symétries pour la structure cristalline (et donc choisir parmi tous les groupes cristallins possibles, qui ont été énumérés).

Cela dit, le principe de Curie ne se vérifie pas lorsqu'il y a des brisures de symétries. On dit

alors que c'est l'ensemble des résultats possibles qui le respecte, mais par un résultat individuel, ce qui donc ne permet aucune prédiction. Voir l'article pour plein d'exemples (fluide en rotation, instabilités hydrodynamiques en général...).

Principe de Curie, théorème de Wigner, théorème de Neother, sont similaires en ce qu'ils donnent des informations à partir de symétries. Montre qu'en physique moderne, on renverse les choses : on part de symétries (qu'on suppose souvent) pour en déduire des lois (alors qu'avant on postulait les lois puis on étudiait les symétries).

L'asymétrie chirale dans les molécules du vivant pourrait venir de la violation de P (parité miroir) par l'interaction faible et donc dans les noyaux... et l'asymétrie matière/antimatière de la violation de CP.

Remarque sur l'analyse dimensionnelle : Créée vers 1820 par Fourier, développée entre autres par Reynolds. Le théorème de Vashy (ou théorème Pi) joue un rôle analogue au principe de Curie et date de 1911.

LP 5 – Cinématique relativiste

Plan

Bibliographie :

- **BFR** mécanique 1 : presque tout.
- **Langlois**, Perez : bons compléments.
- Hecht Physique : des ordres de grandeurs.
- Jackson : expériences plus récentes.
- **Panorama de la physique** : OG modernes (LHC, ...).

Introduction

I - Insuffisances de la cinématique classique

1 Le principe de relativité

Définir un référentiel : la donnée d'une horloge et de trois points fixes permettant de repérer l'espace.

Définir un événement : la donnée des coordonnées (x, t) .

On veut que des observateurs dans des référentiels différents, observant les mêmes phénomènes, décrivent la physique de façon cohérente. D'où :

Principe de relativité : invariance des lois de la physique par changement de référentiel. Ce principe sert de définition des référentiels inertiels ou galiléens : ce sont ceux dans lesquels les lois de la physique s'expriment de la même façon. En particulier, la 2^{ème} loi de Newton (ou son analogue relativiste) est valable, mais c'est plus général : toutes les lois sont valables.

Il reste à définir quels sont ces référentiels (on verra qu'ils sont en translations uniforme les uns par rapport aux autres, ce sont donc les mêmes qu'en mécanique classique), et les lois donnant les coordonnées des événements dans l'un et dans l'autre (qui sont différentes de celles de la mécanique classique, c'est justement le grand pas contre-intuitif qu'il a fallu franchir).

2 La transformation Galiléenne

On dispose des changements de référentiels galiléens. Avec les lois de la mécanique classique, le principe de relativité est bien vérifié. Mais, il ne l'est pas pour l'électromagnétisme : les équations de Maxwell prévoient des OGM dans le vide allant à c , quel que soit le référentiel.

Deux solutions : les équations de Maxwell sont valides dans un seul référentiel (qui prend alors un statut très particulier de référentiel absolu), ou bien les transformations de Galilée sont erronées.

3 L'expérience de Michelson et Morley

Juste présenter l'idée, sans calculs. On se place dans le référentiel terrestre, galiléen. Les vitesses selon chaque bras sont différentes : on s'attend à voir bouger les franges si on tourne l'appareil. Ce n'est pas le cas.

Rq : Ce n'est pas une preuve définitive. En particulier on suppose ici l'éther immobile, alors qu'il pourrait par exemple être entraîné par la Terre. Cette dernière hypothèse a été étudiée à l'époque (voir par ex. le livre d'Einstein et Infeld, L'évolution des idées en physique) et rejetée.

Rq2 : Pour le calcul du temps de trajet selon le bras orthogonal, se placer dans le référentiel absolu, puis utiliser le fait que $T = T'$.

II - Les bases de la cinématique relativiste

1 Postulats de la relativité restreinte, BFR.

Les lois physiques sont invariantes par changement de référentiel galiléen (encore faut-il préciser quelles lois).

Invariance de c .

Validité de la mécanique classique à $v \ll c$.

2 Perte de simultanéité

Définir simultanéité (Perez) : deux événements au même t .

Exemple de Feynman : un expérimentateur au milieu d'un wagon envoie un photon de chaque côté. Dans le référentiel du wagon, l'arrivée des photons est simultanée, pas dans le référentiel où le wagon bouge.

→ motive le fait que t n'est plus absolu. Peut aussi être motivé par les expériences du CERN (cf plus bas).

3 Transformations de Lorentz

On peut démontrer la transformation de Lorentz (mais on l'admet) : pour R' en mouvement à v par rapport à R , $x' = \gamma(x - vt)$, $ct' = \gamma(ct - (v/c)x)$.

III - Conséquences de la relativité restreinte

1 Vitesse limite, et donc finitude de la propagation des interactions et de l'énergie.

2 Composition des vitesses

Donner la loi. Cas particulier de $v = c$, et confirmation expérimentale avec les muons du CERN (BFR).

On peut traiter de l'expérience de Fizeau.

3 Dilatation du temps

Temps propre. Puis dilatation du temps : ça va plus vite dans le référentiel en mouvement.

Parler de la réciprocité : $\Delta t = \gamma \Delta t_0$ et vice versa (BFR). Ouvrir sur le paradoxe des jumeaux (qui est expliqué correctement dans BFR).

Expérience avec les muons.

4 Contraction des longueurs : transparent. Parler aussi de réciprocité (un observateur en mouvement mesure des longueurs contractées, mais un observateur au repos voit aussi la personne en mouvement contractée).

5 Invariance de l'intervalle Δs ; passé, présent, futur

Donner l'invariant relativiste. Montrer que pour des changements de référentiels à $v < c$, on n'a pas simultanéité, mais on a tout de même respect de l'ordre chronologique, et c'est en ce sens que la causalité est préservée.

Conclusion et ouverture

Vers la dynamique relativiste.

Remarques

Paradoxe des jumeaux

Il est bien expliqué dans BFR. On peut aussi consulter <http://www.phys.vt.edu/~takeuchi/relativity/notes/section15.html> pour une approche graphique. Il y a aussi une bonne explication dans le livre de Landau (théorie des champs).

Démonstration de la transformation de Lorentz

Voir BFR, appendice.

On suppose l'espace homogène et isotrope. On suppose le principe de relativité : les lois de la physique sont les mêmes dans la classe de référentiels étudiés – dans ceux que l'on veut justement caractériser, qu'on va appeler les référentiels inertiels. En particulier, on utilise le fait qu'un objet en translation rectiligne uniforme dans un référentiel inertiel l'est dans un autre pour montrer la linéarité de la transformation. On utilise aussi le fait que la transformation permettant de passer de l'un à l'autre est la même que pour passer de l'autre à l'un. Sous ces hypothèses, on aboutit à :

- Si on veut un temps absolu ($t = t'$), on obtient les transformations de Galilée.
- Si on veut une vitesse v_0 invariante par changement de référentiel, on obtient les transformations de Lorentz. L'électromagnétisme nous dit que $v_0 = c$.

On peut se passer de l'hypothèse d'une vitesse invariante. Si on impose une structure de groupe aux transformations (la composition de deux changements de référentiel est régie par la loi d'un changement de référentiel), alors on arrive soit à Galilée (que l'on rejette pour interdire les actions à distances, que l'on rejette également expérimentalement avec de multiples expériences), soit à Lorentz avec une vitesse v_0 invariante par changement de référentiel, qui s'identifie via des expériences à la vitesse des photons c .

Remarque : Les transformations de Lorentz n'interdisent pas les particules supraluminiques. La dynamique relativiste montre qu'il est impossible d'accélérer une particule avec $v_{\text{initial}} < c$ au delà de c , mais ne dit pas qu'il est impossible qu'il en existe avec $v > c$. C'est la volonté d'une localité des interactions qui l'impose (si de l'information ou de l'énergie se propage à une vitesse arbitrairement grande, ce qui se passe en un point peu être affecté par ce qu'il se passe à des distances arbitrairement élevées), ainsi que le respect de l'ordre chronologique et de la causalité (l'ordre des événements n'est conservé par changement de référentiel que si ce changement est pour une vitesse inférieure à c , de plus, on peut montrer que si on peut envoyer de l'information avec une vitesse supérieure à c , alors on peut envoyer des messages dans le passé ou agir sur le passé¹).

En conclusion, la relativité restreinte dit que si l'on peut propager de l'information ou de l'énergie à une vitesse supérieure à c , alors ce qui se passe au temps t en x peut être influencé par ce qu'il se passe n'importe où et n'importe quand (y compris dans le futur), et que l'on peut par exemple agir sur le passé. C'est parce qu'on croit que cela est impossible (notamment parce que sinon, comme nous sommes des individus conscients, nous pourrions nous amuser à produire plein de paradoxes temporels) que nous disons qu'il est interdit de propager de l'information ou de l'énergie à une vitesse supérieure à c .

1. <http://www.phys.vt.edu/~takeuchi/relativity/notes/section10.html>.

LP 6 – Dynamique relativiste

Plan

Bibliographie :

- **BFR** mécanique 1 : presque tout.
- **Langlois** : Compton malin, coupure GZK.
- Perez.
- Hecht Physique : des ordres de grandeurs.
- Jackson : expériences plus récentes.
- **Cagnac** : effet Compton, détails expérimentaux.
- **Panorama de la physique** : OG modernes, rayons cosmiques.

Niveau L2, pré-requis :

- Cinématique relativiste.
- Quatre-vecteur position, temps propre.

Introduction

On a vu la cinématique relativiste et le principe de relativité : les lois doivent être invariantes par changement de référentiel inertiel. Or ce n'est pas le cas du PFD.

On veut conserver la conservation de l'impulsion et de l'énergie, car relié à l'invariance par translation spatio-temporelle.

Tout le long : donner des OG.

I - Principes de la dynamique relativiste

1 Énergie et quantité de mouvement

Suivre BFR. On veut une conservation de l'énergie et de l'impulsion covariante par changement de référentiel, donc écrite sous forme de 4-vecteurs. On construit le 4-vecteur à partir de $V = dX/d\tau$, où τ est le temps propre et X le 4-vecteur position.

Pythagore-Einstein.

Rq : ce n'est pas une démonstration. On peut le démontrer à partir d'arguments généraux (Tollman, voir BFR, ou Jackson).

2 Énergie cinétique et énergie de masse

Énergie de masse : cas d'une désintégration de l'uranium par exemple.

3 Le cas du photon : masse nulle car $v = c$. Donc $E = pc$.

4 Équation du mouvement

Donner le PFD.

II - Mouvement d'une particule chargée

1 Dans un champ électrique uniforme et constant

Faire le cas avec E_x et vitesse initiale selon y : souligner que v_y tend vers 0, et donc que toutes les composantes de v sont couplées par le facteur de Lorentz.

Application : expérience de Bertozzi.

- 2 **Dans un champ magnétique uniforme et constant** (à passer si pas le temps)
Ici aussi, si vitesse selon B , le mouvement de rotation perpendiculaire à B est modifié (via γ).
- 3 **Application aux accélérateurs** (à passer si pas le temps)

III - Collisions

1 Collisions inélastiques, énergie de seuil

On se place dans le référentiel du centre d'inertie car c'est seulement dans celui-ci qu'on peut avoir des énergies cinétiques nulles pour toutes les particules.

Application à la coupure GZK (Langlois).

2 Exemple de collision élastique : effet Compton

Suivre la seconde démonstration de Langlois.

Conclusion et ouverture

Vers l'hydrodynamique relativiste.

Remarques

Processus à trois corps

Pas de processus du type $0 \rightarrow 1 + 2$ avec conservation de la masse. En effet, dans le référentiel où 0 est immobile :

- Si $m_0 = m_1 + m_2$, alors $m_0c = \gamma_1 m_1 c + \gamma_2 m_2 c$ donne que $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$, pas très intéressant.
- Si $m_1 = m_0$ et $m_2 = 0$ (de type $A^* \rightarrow A + \gamma$), alors on montre aussi que nécessairement $\gamma_1 = 1$, ce qui n'est pas possible car $p_{A^*} = -h\nu/c$.

LP 7 – Notion de viscosité d'un fluide. Écoulement visqueux.

Jury :

Couette cylindrique n'est pas génial. Réfléchir aux mécanismes de dissipation dans les fluides. Mettre clairement en évidence le caractère diffusif des forces de viscosité. Conditions d'application de NS. Compétition entre transfert convectif et diffusif. Re = rapport de temps. Présenter un modèle microscopique de viscosité. Ne pas confondre écoulement turbulent et tourbillon. Manip de Couette plan : s'assurer qu'on est en régime permanent. Traiter le point de vue énergétique.

Plan

Bibliographie :

- **Guyon, Hulin, Petit** : interprétation de la viscosité pour un fluide (et non pas d'un gaz), compléments.
- **Cap Prépa** : presque toute la leçon.
- **Tout en Un Sanz** : compléments.
- **Olivier Tec&Doc PC** : expérience de Couette plan bien décrite.
- Portelli, la physique par la pratique : démonstration de la viscosité d'un gaz (exercice sur le Dewar).
- Handbook
- Carpentier, La physique en applications : écoulement de Poiseuille dans une conduite.

Manips :

- Vider burettes d'eau et de glycérol : la différence n'est pas expliquée par l'équation d'Euler.
- Déplacer palet sur réservoir de glycérol : le colorant forme une droite. Montre l'existence de forces tangentielles, donc autres que la pression.
- Réversibilité de l'équation de Stokes en tournant du glycérol.

Niveau L2, pré-requis :

- Hydrostatique, cinématique des fluides. Dérivée particulière.
- Modèle cinétique des gaz.
- Équation de la chaleur.
- Premier principe version industrielle.

Introduction

Au choix : **Manip** de couette plan s'il y a un dispositif adapté (voir Olivier), ou **Manip** en vidant une burette d'eau et une de glycérol. Ça ne va pas au même rythme : c'est donc qu'il y a un paramètre intensif différent entre ces deux fluides. Notion intuitive : le glycérol est visqueux. Pour Couette plan : il existe des forces tangentielles.

But : formaliser tout ça.

Rq pour les burettes : densité de 1.26 et de 1 pour l'eau et le glycérol. En fait, d'après la formule de Torricelli pour un écoulement parfait, le temps de vidage ne dépend pas de ρ (mais attention, ce n'est pas dans les pré-requis).

I - Viscosité d'un fluide

1 Force tangentielle surfacique, expérience de Couette

Expérimentalement : $F_x = \eta dv_x/dy$. Dire que la puissance fournie par l'utilisateur n'est

pas transmise à la plaque du bas (puisqu'elle ne bouge pas), mais dissipée dans le fluide. OG.

2 Force volumique de viscosité et équation de Navier-Stokes

Cas simple précédent, puis généralisation : $dF/d\tau = \eta \nabla^2 v$.

Vrai uniquement si Newtonien et si incompressible.

Conditions aux limites pour l'équation : $v = 0$ sur les parois.

Mettre en évidence le caractère diffusif des forces de viscosité en écrivant $\partial v / \partial t = (\eta / \rho) \nabla^2 v$: $\eta / \rho \equiv \nu$ est un coefficient de diffusion.

Dans la manip de Couette, on met en mouvement le fluide à une distance $\delta = \sqrt{\nu t}$. Peut expliquer un profil non linéaire.

3 Interprétation microscopique de la viscosité

Modèle pour les gaz (Cap Prépa, et aussi GHP). $\eta \propto \rho l_{\text{pm}} v_{\text{th}}$, avec $\rho l_{\text{pm}} \sim 1/\sigma$, σ section efficace de collision.

Parler du cas des fluides : GHP.

4 Facteurs influençant la viscosité

Gaz : augmente si T augmente. Fluides : l'inverse. Sortir le Handbook.

II - Dynamique des écoulements visqueux

1 Nombre de Reynolds, $R_e = UL/\nu$.

Diffusion sur advection. Écrire aussi l'équation sous forme adimensionnée.

Compare uniquement $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ à $\eta \nabla^2 \mathbf{v}$.

Voir Guyon au chapitre "écoulements à petit R_e ", qui résume les interprétations de R_e et donne des OG (glaciers, manteau, ...).

Rq : deux systèmes avec un même R_e se comportent identiquement, à condition de rester dans les mêmes hypothèses (incompressible par exemple, donc subsonique).

2 Couches limites : épaisseur.

Argument dimensionnel : on estime $(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ et $\eta \nabla^2 \mathbf{v}$ et on dit que la limite est quand les deux sont égaux.

3 Natures des écoulements (si temps). Rampant (i.e. laminaire et symétrique), laminaire : d'abord asymétrique, puis avec de la recirculation, puis les tourbillons oscillent, se détachent (pas sûr qu'on soit encore dans la définition de laminaire à ce moment là), puis sillage turbulent avec couche limite laminaire, puis crise de traînée lorsque le sillage devient turbulent.

III - Écoulement de Poiseuille dans un tuyau

Cf exo du Cap prépa (ou dans le Carpentier, plus (trop) complet) : en cylindrique ce n'est pas très compliqué, + applications numériques pour l'eau du réseau d'eau. Attention cependant, de l'eau dans un tuyau dans ce cas là c'est $R_e \sim 10^4$, donc plus forcément laminaire (pour un écoulement dans une conduite, il y a apparition de turbulence pour $R_e \sim 2 \times 10^3$, cf Carpentier, qui est une valeur élevée car dans le cas d'un écoulement laminaire, le terme convectif est strictement nul). La perte de charge est-elle plus importante ? Probablement car turbulence implique plus de dissipation, mais pas sûr.

Bilan énergétique si temps (suivre alors Carpentier, avec le premier principe en écoulement, estimer aussi l'élévation de température (0.01 degré)).

Conclusion

Remarques

Donner beaucoup d'OG. Tableau avec des R_e , des viscosités, ...

Divers

Les frottements sont importants pour une voiture ou un cycliste, alors que $R_e \gg 1$: paradoxe de d'Alembert. (Voir leçon suivante dans les remarques.)

Forme générale de Navier-Stokes : terme en $(\lambda + \eta)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v})$. (et même dans ce cas, on suppose encore les viscosités constantes).

Vocabulaire

Écoulement tourbillonnaire : pour lequel $\nabla \wedge \mathbf{v} \neq 0$. C'est le contraire d'un écoulement irrotationnel.

Écoulement turbulent : non stationnaire, fluctuations importantes à la fois temporelles et spatiales, sur une large gamme d'échelles allant de la taille du système jusqu'à des échelles où la viscosité dissipe de l'énergie. Un tel écoulement est tourbillonnaire (et la vorticité est elle-même fluctuante).

Écoulement laminaire : les lignes de courants sont parallèles et bien définies. C'est le cas à bas R_e , même en présence de recirculation.

Écoulement rampant : pour $R_e \ll 1$, en plus d'être laminaire, l'écoulement est symétrique (et donc en fait réversible au sens de l'équation de Stokes : si on force l'écoulement dans l'autre sens, il suit les mêmes lignes de courant).

Pression

Pression dans un gaz raréfié : il s'agit en fait d'un flux de quantité de mouvement. On arrive au tenseur de pression $P_{\text{cin}} = nm\mathbf{v}\mathbf{v}$. Dans un gaz où la distribution des vitesses est isotrope, on démontre alors que $P_{\text{cin}} = nk_B T$ avec T la température cinétique (définie à partir de la moyenne de la vitesse au carré).

C'est équivalent au point de vue des collisions car "faire demi-tour revient à traverser une surface".

Plus compliqué dans un fluide dense. Ce n'est plus seulement la pression cinétique P_{cin} , car il s'y ajoute la pression moléculaire π . En effet, les interactions entre molécules sont importantes, et elles sont attractives tant que les molécules ne sont pas trop proches, répulsives si elles sont trop proches.

Pour un fluide pas trop comprimé, π est négative : elle a un effet de cohésion. On a donc au total une pression hydrostatique P (qui est la force par unité de surface transmise au sein du fluide si, par exemple, le fluide est enfermé dans un piston sur lequel on appuie avec une force P par unité de surface) donnée par : $P = P_{\text{cin}} - |\pi|$, avec $P_{\text{cin}} \sim \pi$ mais $P > 0$ tout de même. ($|\pi|$ peut dépasser P_{cin} et ainsi donner $P < 0$ si l'on étire suffisamment le fluide, ce qui n'est pas courant.) En revanche si le fluide est fortement comprimé, on a $\pi > 0$ qui donc s'ajoute à P_{cin} . Noter bien que P_{cin} est toujours dû à l'agitation thermique.

Sources : L'Arpenteur du web (BUP) : http://www.udppc.asso.fr/national/attachments/article/Arpenteur_du_Web_Pression_dun_fluide_VF2.pdf ; BUP 455 (1960), La notion de pression en statique des fluides, Brin A. & Merigoux R.

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

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa et Sanz Tout en Un PC.
- Perez pour l'application numérique sur la trompe à vide.
- Guyon, Hulin, Petit

Manips :

- (Si temps) Balle de ping-pong, on peut même estimer C_x en mesurant la vitesse du flot avec l'anémomètre (Quaranta I).
- Trompe à vide.

Introduction

On a vu les écoulements visqueux. On étudie ici la limite où la viscosité est négligeable. Point important : la relation de Bernoulli, qui permet de calculer beaucoup de choses simplement.

I - Modèle de l'écoulement parfait

1 Écoulement parfait

2 Validité

À grands Reynolds.

Valide en dehors des couches limites, dont l'épaisseur est en $Re^{-1/2}$.

3 Équation d'Euler

Conditions aux limites : non pénétration.

Elle est valable même dans le cas compressible.

II - Relations de Bernoulli

1 Énoncé et démonstration

2 Interprétation énergétique via le premier principe pour les systèmes ouverts

Suivre Cap Prépa.

III - Applications

1 Effet Venturi

Manip avec une trompe à vide (idem filtre Buchner). Mettre un manomètre pour mesurer la dépression. Noter qu'on ne peut pas descendre en dessous de la pression de vapeur saturante de l'eau. OG.

2 Effet Coanda, ailes d'avions, ...

Pour Coanda, on peut raisonner avec Bernoulli ou avec l'équation d'Euler (accélération convective dans la base de Frenet).

Conclusion et ouverture

Par exemple cavitation...

Remarques

J'ai présenté cette leçon avec ce plan là à l'oral. Le timing était bon.

Cavitation

Lorsque la vitesse du fluide augmente (autour d'une hélice par exemple), la pression diminue, et si elle passe en dessous de P_{sat} , il y a création de bulles.

Fonction courant et potentiel

Potentiel : pour un écoulement irrotationnel, $\nabla \wedge \mathbf{v} = 0$, donc $\mathbf{v} = \nabla \phi$. Si en plus incompressible, alors $\nabla^2 \phi = 0$.

Fonction courant : pour un écoulement incompressible, donc avec $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$.

Paradoxe de d'Alembert

Pour un fluide parfait *en écoulement potentiel* (pas de vorticité au départ, et donc nulle partout à cause du théorème de Kelvin), on montre que la force de traînée sur un objet est $\propto dv/dt$ où v est la vitesse de l'objet, et est donc nulle à vitesse constante. Dans beaucoup de situations pratiques, c'est faux.

La conclusion est qu'il faut tenir compte des couches limites, aussi petites soient-elles. Elles créent de la vorticité, créent un sillage en aval qui se propage jusqu'à l'infini, et il n'y a plus de zone finie où l'écoulement reste potentiel.

Remarque : un écoulement parfait turbulent prédit par contre une force de traînée à v constant. Mais pour créer de la turbulence il faut créer de la vorticité quelque part, ce qui n'est pas possible dans un écoulement parfait, et se produit encore une fois dans les couches limites.

Remarque : le théorème de Kelvin est valable pour un fluide barotrope ($\rho = \rho(P)$), ou incompressible (ce qui est un cas particulier de barotrope). Marche pour un gaz s'il est considéré incompressible ($v \ll$ vitesse du son).

Effet Coanda

L'effet : lorsqu'un solide convexe est placé contre un jet de fluide, les lignes de courant s'incurvent et le jet a tendance à longer le solide.

Explication : Partons d'un jet sans obstacle. Il entraîne avec lui une partie du fluide environnant, ce qui résulte en un gain de quantité de mouvement. Il le fait de manière symétrique, et donc il n'est pas dévié.

Mais si on place un objet convexe d'un coté du jet, l'entraînement du fluide environnant ne se fait plus que du coté opposé à l'objet. Cet entraînement asymétrique a tendance à plaquer le jet contre l'objet.

Autre point de vue : si le jet ne suit pas l'objet, alors il se crée une zone de dépression entre le jet et l'objet (puisque le jet entraîne en partie le fluide de cette zone), qui donc "rappelle" le jet.

Attention : l'effet Coanda ne fonctionne pas toujours : il peut y avoir décollement du jet, avec entre le jet et l'objet une zone de recirculation (un tourbillon) ou une zone turbulente.

On ajoute en général en même temps que lorsque l'on a des lignes de courants courbes, la pression est plus faible vers le centre qu'en périphérie. C'est vrai, mais ça n'a pas beaucoup de rapport avec l'effet Coanda. Ceci se démontre, *pour un champ de vitesses donné*, à l'aide de l'équation d'Euler écrite comme $\rho v^2/R = -\partial_x p$ (en projection sur la normale aux lignes de courant, l'axe x s'en éloignant).

Effet Magnus et portance

On considère un écoulement potentiel (irrotationnel (?pour la suite) et parfait).

Force de portance sur un objet 2D : $\propto \rho_{\text{air}} U \Gamma$, avec Γ la circulation du fluide autour de l'objet.

Force de portance sur un objet 3D : nulle, car on peut choisir une surface s'appuyant sur le contour qui est complètement dans le fluide, et donc la circulation, qui est l'intégrale du rotationnel de \mathbf{v} sur cette surface, est nulle. En pratique, la force de portance s'exerçant sur les balles et ballons en rotation est due à l'adhérence du fluide aux parois (par viscosité, donc on sort du cadre de l'écoulement parfait), qui est entraîné.

Dans les deux cas (2D et 3D), on peut estimer le sens de la portance en appliquant Bernoulli en haut et en bas. On peut aussi le faire en disant que si du fluide est envoyé en bas, l'objet monte.

Voir GHP.

Autres lectures :

Les calculs dans le cadre 2D utilisent le théorème de Joukowski afin de fixer la valeur de la circulation (qui sinon n'est pas déterminée). Ce théorème dit que l'écoulement ne contourne pas le bord de fuite (il ne remonte pas), mais s'échappe bien de là vers l'aval. Le bord de fuite du profil a donc un rôle important. Et on le constate expérimentalement. "Ce qu'il faut souligner est le rôle du bord de fuite pointu dans le mécanisme d'apparition de la portance, l'écoulement s'ajustant de façon à éviter le contournement de cette pointe."

Aile d'avion

On trouve évidemment plein d'explications.

Si on se donne une distribution des lignes de courant autour d'un profil d'aile, par exemple celle de la figure 2 de centrale TSI 2015 (<http://www.concours-centrale-supelec.fr/CentraleSupélec/2015/TSI/sujets/2014-010.pdf>), alors on peut dire sans "mentir" que :

- les lignes sont plus resserrées sur le dessus de l'aile (flagrant sur la figure de droite),
- donc ça va plus vite qu'en dessous (car écoulement incompressible),
- donc d'après Bernoulli la pression est plus faible en dessus,
- donc il y a une portée vers le haut.

Évidemment on se donne le profil de vitesses (il est soit expérimental, soit numérique), et c'est *à partir de cette donnée* qu'on constate une vitesse supérieure sur le dessus par rapport au dessous. On ne déduit pas ceci de considérations farfelues. Si on se donne le profil de vitesses d'un avion volant sur le dos on fera le même constat et on pourra expliquer par le même raisonnement qu'il y a une poussée vers le haut.

Comment expliquer ce profil de vitesse? Plusieurs pistes :

- L'angle d'attaque a un rôle crucial sur cette répartition du flot dessus/dessous. L'article de Charles Eastlake (the physics teacher Vol 40 march 2002) parle du rôle important du

point de stagnation du flot à l'avant de l'aile (p.7) : avec un angle d'attaque tel que l'aile soit tournée vers le sol, ce point est déplacé vers le dessous de l'aile, ce qui fait finalement qu'il y a plus de fluide qui passe dessus, et donc qu'il doit passer plus vite.

Mais ça ne fait que repousser la question : peut-on expliquer simplement pourquoi le point de stagnation se déplace vers le dessous ?

- La vidéo suivante <https://www.youtube.com/watch?v=VEe7Nx5Vo8> prend comme point de départ l'effet Coanda. Cet effet (qui n'est pas non plus trivial à expliquer et qui reste un postulat de départ : l'air suit l'aile) implique une certaine courbure du fluide, et si on analyse son sens et qu'on applique le résultat qui dit que p décroît vers l'intérieur du "virage", alors on voit bien qu'il va y avoir une portance vers le haut.

On explique alors, comme conséquence, que le flot au dessus va aller plus vite que celui au dessous (en analysant le champ de pression). Appliquer Bernoulli est alors superflu, puisque cela permet de montrer qu'on a une pression plus faible au dessus qu'au dessous, ce que l'on a déjà montré.

Poussée d'Archimède

Voir aussi Cap prépa PC p. 214.

Hypothèses :

- Fluide au repos (il faut pouvoir utiliser la formule $\vec{\nabla}P = -\rho\vec{g}$).
- \vec{g} uniforme (car on fait sortir \vec{g} de l'intégrale sur le volume, mais cela dit s'il n'est pas constant on le laisse dedans et la poussée d'Archimède reste égale au "poids du fluide déplacé", le poids étant moins simple à calculer).
- Si on remplace l'objet par le fluide, alors le fluide ne bouge pas (cf plus bas).
- L'objet n'est pas en contact avec une paroi du récipient.

La démonstration avec les mains utilise le fait que l'on veut calculer $\oint_S P d\vec{S}$, et que ceci ne dépend que de la forme de l'objet, pas de sa constitution. On peut donc le remplacer par du fluide : on obtient alors une situation au repos, c'est donc que le volume de fluide en question est soumis à des forces qui se compensent : en l'occurrence la résultante des forces de pression $\vec{\Pi}$ (que l'on cherche) et son propre poids. D'où l'égalité.

On voit déjà ici que dans le cas d'un objet dans un liquide qui flotte et qui dépasse du liquide, alors $\vec{\Pi}$ comprend la force de pression exercée par l'air.

La démonstration mathématique utilise l'identité

$$\oint_S P d\vec{S} = \iiint \vec{\nabla}P dV = - \iiint \rho\vec{g} dV. \quad (3.1)$$

Considérons un objet immergé qui affleure tout juste la surface. Soit Σ la surface affleurante (donc en contact avec l'air), et \mathcal{S} la surface immergée (donc en contact avec l'eau). La surface totale de l'objet est $S = \Sigma + \mathcal{S}$. Soit P_0 la pression à la surface de l'eau. On peut imaginer que l'objet est en réalité très légèrement immergé, si légèrement que la pression sur Σ est toujours P_0 et que ça ne change rien à la résultante des forces. Alors on peut appliquer le théorème d'Archimède, et on a bien que la force pressante due à l'eau sur \mathcal{S} + la force pressante due à P_0 sur Σ est le poids du fluide déplacé. Ceci inclut donc bien la force de pression de l'air sur l'objet. On peut d'ailleurs écrire :

$$- \iiint \rho_{\text{eau}}\vec{g} dV = \oint_S P d\vec{S} = \iint_{\Sigma} P_0 d\vec{S} + \iint_{\mathcal{S}} P d\vec{S}. \quad (3.2)$$

Enfin, considérons un objet qui dépasse en partie de l'eau. On peut le couper en deux par la pensée au niveau de la surface, et on est pour chaque partie dans le cas précédent. Pour la partie

immergée :

$$- \iiint_{V_{\text{imm}}} \rho_{\text{eau}} \vec{g} dV = \oint_S P d\vec{S} = \iint_{\Sigma} P_0 d\vec{S} + \iint_S P d\vec{S}. \quad (3.3)$$

Pour la partie émergée :

$$- \iiint_{V_{\text{émm}}} \rho_{\text{air}} \vec{g} dV = \oint_{S'} P d\vec{S} = \iint_{\Sigma'} P_0 d\vec{S} + \iint_{S'} P d\vec{S}. \quad (3.4)$$

On voit déjà que si l'on néglige la contribution due à l'air (la deuxième équation) et qu'on garde uniquement celle de l'eau, on garde tout de même la contribution de la pression P_0 sur Σ . Maintenant si on somme les deux, le terme sur Σ et Σ' se simplifie et on obtient :

$$- \iiint_{V_{\text{émm}}} \rho_{\text{air}} \vec{g} dV - \iiint_{V_{\text{imm}}} \rho_{\text{eau}} \vec{g} dV = \iint_{\Sigma} P d\vec{S} + \iint_{S'} P d\vec{S}. \quad (3.5)$$

Ceci inclut bien toutes les contributions des forces de pression, à la fois air et eau.

Notons enfin que ceci ne fonctionne pas si P n'est pas identique au niveau de la surface fictive où l'on sépare l'objet en deux. Par exemple dans le cas (cf Perez, mécanique) d'une sphère incrustée dans une paroi verticale, on n'a pas égalité de P sur ce qui serait ici Σ et Σ' , et donc les termes sur ces surfaces ne se simplifient pas, et on aboutit à quelque chose qui n'est pas la contribution des forces de pression recherchée.

De même, il y a un problème si l'objet touche le fond du récipient : encore une fois, imaginons que l'on soulève légèrement l'objet. Le poids du fluide déplacé donne alors

$$- \iiint \rho_{\text{eau}} \vec{g} dV = \oint_S P d\vec{S} = \iint_{\Sigma} P d\vec{S} + \iint_S P d\vec{S} \quad (3.6)$$

où cette fois Σ est la surface au contact avec le récipient. Mais si l'objet touche le récipient, alors la force $\iint_{\Sigma} P d\vec{S}$ n'existe pas, et ce que l'on veut calculer est seulement $\iint_S P d\vec{S}$. Il faut donc retrancher le premier terme.

LP 9 – Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Jury :

Lien avec les potentiels thermodynamiques. Interprétation microscopique. Faire un exemple en dynamique. L'étude énergétique de l'interface doit s'appuyer sur une thermodynamique rigoureuse, où les systèmes et les transformations étudiés sont définis avec une grande précision.

Plan

Bibliographie :

- De Gennes, Gouttes, perles et ondes : presque tout.
- Sanz PC nouveau programme : approche alternative à De Gennes.
- Choimet thermodynamique : démonstration de la loi de Laplace avec le potentiel thermodynamique.
- Guyon, Hulin, Petit, hydrodynamique physique : ondes de surface.
- Diu, thermodynamique (au cas où).

Manips :

- Trombone dans l'eau, cadre avec film de savon.
- Petite et grosse bulles reliées (loi de Laplace).
- Pissette d'eau pour illustrer Rayleigh-Plateau.

Introduction

Trombone dans l'eau : il flotte à la surface, mais pas si on l'immerge complètement.

I - Tension de surface : origine et définitions

1 Origine et définition

Coût d'une interface avec l'interprétation microscopique. Estimation de $\gamma \sim k_B T_{\text{eb}} / \sigma$ (et non pas $k_B T / \sigma$ qui donne une dépendance fautive en T).

Introduire γ avec l'énergie, puis ensuite comme force par unité de longueur.

OG.

II - Interface entre deux fluides

1 Loi de Laplace

Démo avec G^* (Choimet). **Manip** : petite et grosse bulles reliées.

2 Instabilité de Rayleigh-Plateau

Juste très qualitatif : montrer que pour minimiser la surface il vaut mieux faire des gouttes d'une certaine taille. Voir Gouttes, perles et ondes. **Illustrer** avec une pissette d'eau.

Ou alors faire Rayleigh-Taylor (et manip avec un tube à cuve de spectro qui, retourné, ne se vide pas).

III - Mouillage : trois phases

1 Paramètre de mouillage

$S = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG})$. Positif : mouillage total, interpréter en terme d'énergie.

2 Loi de Young-Dupré

Bilan des forces sur la ligne triple. (On peut aussi faire l'approche thermo, mais alors il faut bien définir le système, le potentiel, ce qui n'est pas évident). Attention à parler de la réaction du support et à la faire apparaître sur le schéma.

IV - Compétition gravité-capillarité

1 Forme des gouttes, nombre de Bond

Qualitatif. $l_c = \sqrt{\gamma/(\rho g)}$.

2 Ascension capillaire, loi de Jurin

Démo en énergie et en pression (selon temps).

3 Vitesse d'ascension

La loi de Jurin en dynamique : établir la vitesse de montée.

Conclusion et ouverture

Remarques

Pour une justification du $F(t) = \text{cst}$ dans Bernoulli, voir l'épreuve A 2004.

γ décroît quand T augmente.

MP 1 – Dynamique newtonienne

Jury 1999 : “Le plus simple est de commencer par donner brièvement un énoncé correct des lois de Newton. Rappelons qu’il n’est pas indifférent de dire « système » ou « solide ».”

Plan

Bibliographie :

- Quaranta I.
- Duffait Capes nouvelle édition : chute de la règle.
- Taillet, dictionnaire.
- Perez, mécanique : formule des moments d’inertie.

Introduction

Définir dynamique newtonienne. Suivre les conseils de jury 1999.

I - Chute libre : illustration de la seconde loi

Réglotte et capteur. Traitement informatique (voir Duffait Capes).

1 Variation de la quantité de mouvement, remonter à g .

2 Conservation de l’énergie mécanique

Exploiter à fond car marche bien.

II - Choc élastique

Avec la table traçante. On prend en photo la feuille, puis on exploite l’image sous Image J pour obtenir les coordonnées des points sous Regressi (il faut jongler entre Image J, Open Office et Regressi pour y parvenir). Le faire une seule fois devant le jury pour montrer. Ensuite, on lance les mobiles pour montrer, puis on prend directement l’enregistrement effectué en préparation.

1 Première loi pour un solide : lancer un seul mobile : tracer la droite à la règle, mesurer grossièrement la distance entre points au début et à la fin. Tourner les choses pour dire qu’on sait que la première loi est vérifiée, et donc qu’on obtient une idée des incertitudes inhérentes à l’utilisation de la table traçante.

Choc : cas d’un système de deux mobiles.

2 Conservation de l’impulsion

3 Conservation de l’énergie (à préparer à la fin si temps, car pas très intéressant et on fait déjà l’énergie pour le pendule et la chute libre...).

Comparer la décroissance de E_{tot} à la manip 1.

III - Pendule pesant

1 Étalonnage du capteur (utile si on veut faire l’énergie).

2 Équilibrage.

3 Mesure du moment d'inertie de la tige (et comparaison notice).

On utilise des mesures de périodes : discuter du facteur de qualité. On peut tracer T en fonction de la position de la masse sur la tige, et remonter à I et g .

4 Étude énergétique.

Attention à l'offset pour l'énergie.

On peut discuter du type de frottement : solide, visqueux.

IV - Mouvement à force centrale

Attacher le mobile avec un ressort à un mobile lesté et immobile.

Conservation du moment cinétique : loi des aires (car force centrale). Conservation de l'énergie (il faut la constante de raideur du ressort : mesure en statique). On peut aussi retrouver la constante de raideur en traçant E_c en fonction de E_p .

Attention : si le mobile commence à tourner, il y a un transfert d'énergie...

Mis en dernier car moins intéressant et ne marche pas très bien.

Remarques

Théorème de Bertrand : les seules forces centrales donnant lieu à des trajectoires fermées sont la loi de Hooke (le ressort, $F \propto r$) et la loi de Newton ($F \propto 1/r^2$).

Dans le premier cas, la trajectoire est une ellipse dont le centre est le point de départ de la force. Dans le deuxième cas, la trajectoire est une conique (ellipse, parabole ou hyperbole (mais dans ces derniers cas ce n'est plus fermé)) dont l'un des foyers est le point de départ de la force.

MP 2 – Surfaces et interfaces

Plan

Bibliographie :

- Quaranta I.
- Handbook : coefficients de frottements.
- De Gennes, Gouttes, perles et ondes.
- Guyon, Hulin, Petit, Hydrodynamique physique.
- Sanz, Tout en un PC nouveau programme.

I - Frottement solide-solide

Illustrations : incliner un plan et voir que ça glisse, puis dé-incliner un peu et montrer l'hystérésis : $\mu_s > \mu_d$.

Illustrer (éventuellement) Amontons-Coulomb.

1 Coefficient de frottement statique (Quaranta I).

Avec un dynamomètre (2 et 20 N) on tire sur un morceau de bois sur lequel on met des masses, le tout sur plan horizontal. Tracer la force à la mise en mouvement $F(M)$ en fonction de la masse M du morceau de bois + masses. Remonter à μ_s . Choisir des surfaces pour lesquelles le coefficient est tabulé.

II - Tension de surface

Introduction avec le film de savon sur le cadre. Définir l'énergie surfacique d'une interface eau/air ou eau/solide, qui servira à tout interpréter dans la suite.

1 Balance d'arrachement (Quaranta I).

Pour l'eau et l'éthanol (ou plutôt uniquement pour l'éthanol, car moins sensible aux salissures) : mesure de γ . Faire plein de mesures et calculer la moyenne et l'incertitude.

Interprétation facile avec le fait que avant l'arrachement, ça devient équivalent au fil métallique dans le cadre tiré par le film de savon.

A la fin, on peut ajouter du **surfactant** pour montrer que γ diminue. Interpréter. (Cela dit, ça prend sûrement trop de temps de faire ça en plus...)

III - Tension de surface et gravité

1 Loi de Jurin (Quaranta I).

Avec de l'éthanol, pour lequel $\cos \theta \sim 0$. Remplir à rabord.

Prendre une photo pour être plus précis, et tout mesurer à partir d'une hauteur arbitraire mais facilement repérable (et comparer l'ordonnée à l'origine avec ce qu'on attend). Vérifier l'horizontalité du dispositif.

Prévoir un sèche cheveux pour sécher et nettoyer avant l'entrée du jury.

2 Ondes gravito-capillaires en eau profonde (Gouttes, perles et ondes).

Cuve à ondes : régler le stroboscope au hasard, et accorder le GBF pour avoir la bonne fréquence (beaucoup plus simple que de faire l'inverse).

Vérifier l'hypothèse d'eau profonde en calculant $\tanh(kh)$. Prendre $h \sim 1$ cm. Amplitude de l'excitation petite.

Difficile de figer l'image : donc on n'utilise pas le stroboscope pour mesurer la fréquence, mais ce qu'affiche le GBF.

Remonter à γ (plus petit que celui tabulé car impuretés), et à g (l'ordonnée à l'origine).

MP 3 – Dynamique des fluides

Plan

Bibliographie :

- Quaranta I mécanique.
- Guyon, Hulin, Petit, Hydrodynamique physique.
- Cap Prépa PC.
- Sanz, Tout en un PC : longueur d'établissement pour Poiseuille.

Peu de manip, bien discuter les hypothèses, les longueurs ou temps d'établissement de régimes permanents, les Reynolds, le choix des diamètres ou longueurs, et faire les incertitudes correctement.

Introduction

Écrire l'équation de Navier-Stokes, avec les OG des différents termes. Dans chaque partie on illustre un régime, qui néglige tel ou tel terme.

I - Viscosimètre à bille

Loi dans Guyon ou Quaranta I.

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 une valeur tabulée (Handbook ou notice, si elle est disponible).

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. Attention, l'incertitude totale est égale à $\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$, où δ_A est l'erreur de type A et δ_B celle de type B.

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds (justifie Stokes), temps d'amortissement du transitoire, influence des parois et du fond (mesurer assez avant le fond). On sait que les termes perturbatif seront en rayon de la bille / distance à la paroi.

II - Écoulement de Poiseuille

Quaranta I, Sanz PSI ancien programme (donne la longueur d'établissement du régime permanent).

Vérification des hypothèses : calcul du Reynolds (justifie que le profil reste laminaire et n'est pas turbulent) : doit être < 2300 . La longueur d'établissement du profil : $0.06 Re$. On peut estimer la correction à faire avec Bernoulli approché, et surtout esquisser le profil.

Ne pas faire débiter sur la balance : plutôt mettre et enlever le bécier violemment, et peser avant/après. Huile de silicone s'il y a des gouttes en sortie du capillaire.

Tubes de 80 cm de long et 2.4 mm de diamètre.

Tracer pour différentes hauteurs d'eau (loi de Darcy : $D \propto \Delta P$), remonter à η_{eau} .

Attention : bien vérifier l'étanchéité au niveau du bouchon !

Remarque : on pourrait aussi essayer de varier le diamètre du tuyau pour avoir la loi de Poiseuille, $D \propto d^4$, mais en pratique on ne peut pas tout faire.

III - Écoulement en soufflerie

Quaranta I à résistance des fluides.

- 1 Tube de Pitot : mesure de δP , plus mesure de v à l'anémomètre : vérifier Bernoulli puis remonter à ρ_{air} . Il est normal de ne pas trouver la bonne valeur...
- 2 Force de traînée : dépendance en v^2 .
Prendre un disque. Montrer la dépendance en v^2 , valide car on est dans le régime où c_x est constant. Remonter à c_{disque} , comparer à la valeur de Quaranta I.
- 3 Force de traînée : dépendance en S .
Différentes sections. Remonter encore à C_x .

Attention : faire le disque. Retendre le petit ressort pour être plus précis sur le 0.

Chapitre 4

Thermodynamique

LP 10 – Gaz parfaits, gaz réels

Plan

Bibliographie :

- **BFR** thermodynamique : températures.
- **Sanz** Tout en un PCSI ancienne édition : définition de la température légale.
- **Cap Prépa** PCSI
- **Précis Bréal** : vraies courbes d'Amagat.
- Handbook : valeurs de a et b du modèle de VdW.
- Diu, Thermodynamique et Diu, Physique statistique.

Niveau L1, pré-requis :

- Bases de thermodynamique.
- Variables d'états, dont énergie interne U , volume, pression thermodynamique.
- Échelle centésimale de température.

Introduction

Nécessité d'équations d'état : et donc de modèles microscopique.

I - Observation et définition expérimentale du gaz parfait

Le formalisme de la thermodynamique a besoin d'équations d'état liant les variables d'état du système pour pouvoir travailler. La loi des gaz parfait, et celle concernant l'énergie interne, ont d'abord une origine expérimentale.

1 Résultats expérimentaux

Comportement dans le diagramme d'Amagat (PV en fonction de P) (voir le Précis Bréal pour de vraies figures, BFR pour le reste) :

La limite à $P = 0$ de PV , pour une mole de gaz, ne dépend que de la température (mesurée d'abord avec une échelle centésimale, par ex. au thermomètre de mercure).

On a $PV = rT$ pour une mole de gaz (loi de Boyle-Mariotte); et r est proportionnel au nombre de moles de gaz (loi d'Avogadro).

2 Température absolue (a ne pas faire, voir rq. dessous)

On définit la température absolue T comme $PV = rT$, avec r choisi à partir d'un point de référence. On a alors $PV = NRT$ avec le bon choix de constante.

Les détails : Échelle légale : la référence est le point triple de l'eau $T_r \equiv 273.16 K$. On mesure PV (pour $P \rightarrow 0$) dans ces conditions. Alors $P_r V_r / T_r = R$ permet une mesure de R , identique pour tous les gaz. Ensuite, la température est $T = PV/R$ pour une mole : on a un thermomètre.

3 Définition expérimentale

On définit un gaz parfait comme un gaz vérifiant PV constant pour tout P . On a donc $PV = NRT$.

Et l'équation sur l'énergie interne ou la mesure des capacités calorifiques ?

Rq : Un système thermodynamique est caractérisé entièrement par la connaissance d'une équation d'état liant les variables d'état et d'une relation $c_v(T)$.

Rq : pour travailler à nb de moles constant, on pèse le gaz. Pour comparer le nb de moles entre différents gaz, on utilise des résultats tels que 2g de H plus 16g de O donnent 18g d'eau, ... et on en déduit les masses molaires relatives.

Rq : il faut en fait aller beaucoup plus vite et ignorer ces histoires de températures. Se contenter de dire qu'on aura une leçon sur les échelles de température, et attendre les questions.

II - Le modèle cinétique du gaz parfait

On cherche un modèle permettant de comprendre la loi $PV = NRT$, et donc aussi ses limites, et donc aussi de faire mieux.

- 1 **Hypothèses** : particules ponctuelles (donc pas de polyatomique) sans interactions à distance. Plus précisément : $E_c \gg E_p$ et $n^{-1/3} \gg a_0$ (a_0 est le diamètre des particules).
- 2 **Température cinétique** : $(3/2)k_B T = \langle (1/2)mv^2 \rangle$. OG.
- 3 **Pression cinétique et équation d'état**
Démonstration simple.
- 4 **Libre parcours moyen** : OG. Rôle pour la thermalisation. N'est pas un paramètre limitant pour le modèle.
- 5 **Énergie interne et capacité calorifique**
- 6 **Gaz parfait diatomique**

III - Du gaz parfait au gaz réel

On peut commencer par voir où sont les limites de notre modèle.

- 1 **Limite en densité et température**, OG.
- 2 **Joule Gay-Lussac** : le refroidissement traduit des interactions attractives.

IV - Descriptions du gaz réel

- 1 **Développement en N/V** (le viriel)
- 2 **Le gaz de Van der Waals** et retour sur Joule Gay-Lussac : prédit bien un refroidissement, sauf pour l'hydrogène qui s'échauffe car interaction courte portée répulsive (Sanz).
- 3 **Propriétés et limites du modèle de Van der Waals**

Conclusion et ouverture

Ouverture sur les transitions de phases

Remarques

Température absolue

On se mord un peu la queue pour définir la température absolue, puisque la propriété “ PV ne dépend que de T lorsque $P \rightarrow 0$ ” suppose définie la notion de température, alors que c’est justement cette propriété qui permet de la définir...

Dans le Tout en un (Sanz), il est expliqué que la propriété en question est d’abord vérifiée pour des échelles de températures centésimales linéaires : on utilise un thermomètre de mercure par exemple, qui est étalonné entre deux points triples, et on fait confiance à ce thermomètre pour donner, au minimum, une représentation mono-évaluée de la “vraie” température. Deux expériences réalisées avec le même niveau de mercure ont alors lieu à la même température vraie.

Conditions pour avoir un gaz parfait

Il faut $E_c \gg E_p$ où $E_c = \sqrt{k_B T/m}$ et E_p est l’énergie potentielle d’interaction (de VdW) entre particules ; et $d \gg r_{part}$ où $d = n^{-1/3}$ la distance inter-particule. Le lien avec le libre parcours moyen l_p et la condition $l_p \gg d$ n’est pas évident du tout.

Choc contre une paroi

Le rebond d’une particule sur la paroi ne se passe pas du tout comme s’il s’agissait d’une bille. Il y a une phase d’adsorption de la particule sur le solide, puis celle-ci est éjectée vers l’intérieur avec une vitesse qui n’a rien à voir avec sa vitesse incidente (ni en direction ni en norme). On est cependant sauvé par le fait que si la paroi et le gaz sont à l’équilibre thermiques, alors en moyenne l’incidence et le rejet se fait selon la distribution de Maxwell à la température commune T .

Gaz de Van der Waals

Il y a dans le Handbook de chimie les valeurs de a et b (de VdW) pour plusieurs gaz.

LP 11 – Premier principe de la thermodynamique

Plan

Bibliographie :

- **Cap Prépa** PCSI : démonstration du principe à partir de la mécanique.
- **Sanz** PCSI ancien programme.
- **Diu** Thermodynamique.

Niveau L1, prérequis :

- Bases de thermodynamique : équilibre, fonctions d'état U et H , variables d'états, capacités thermiques...
- Mécanique du point et des systèmes.
- Gaz parfait.

Manip : agiter du glycérol et mesurer la température.

Introduction

On a vu la thermodynamique et la cinétique des gaz, i.e., la description des états d'équilibre. On veut passer d'un tel état à un autre : qu'est-ce qui contraint de telles transformations. On veut aussi généraliser le théorème de l'énergie cinétique pour prendre en compte les transferts de chaleur.

I - Travail et énergie interne et cinétique

1 Énergie cinétique macroscopique

On considère un système en mouvement global à la vitesse V , ou bien/et constitué de morceaux de masses m_j bougeant à la vitesse V_j .

2 Énergie interne

Définie comme l'énergie cinétique des constituants microscopiques (dans le référentiel du centre de masse de tout le système ou du morceau en mouvement si plusieurs morceaux), plus leur énergie potentielle d'interaction (on suppose donc que les interactions dérivent d'un potentiel).

Extensivité et additivité.

3 Augmentation de température : deux possibilités pour augmenter T : fournir un travail (l'expérience de Joule, je remue, ça chauffe), ou mettre en contact avec un corps plus chaud.

Transition : comment relier tout ça.

II - Le premier principe

1 Énoncé

Insister sur : U fonction d'état, (quasi-)extensivité et additivité, système fermé.

2 Lien avec le théorème de l'énergie cinétique

À partir du TEC au système de N points, Cap Prépa. Pas de calculs, juste faire passer le message : $dE_{c,tot} = W_{int} + W_{ext,tot}$, et on décompose $E_{c,tot} = E_{c,macro} + e_{c,micro}$, $W_{int} = -e_p$, $W_{ext,tot} = W + Q$, d'où $dE_{c,macro} + dU = W + Q$.

3 Travail des forces de pressions

Cas très fréquent à expliciter. Exemple du piston. Prendre le Sanz qui le fait bien (avec le piston).

III - Applications

1 Détente de Joule-Gay-Lussac ou de Joule-Thomson (au choix, mais il faut démontrer le 1er principe industriel pour le second)

Intérêt : montre le caractère non parfait des gaz : Joule-Gay-Lussac prouve que les interactions sont attractive (paramètre a dans VdW), et Joule-Thomson sonde aussi le paramètre b .

Joule-Thomson est aussi utilisée dans les machines thermiques (détendeur).

2 Détermination de capacités calorifiques par calorimétrie

Il faut introduire H . Sanz.

Conclusion et ouverture

Ce principe ne suffira pas, il ne prédit pas le sens d'évolution (la détente pourrait avoir lieu dans l'autre sens), rendement des cycles thermiques inférieur à celui de Carnot. Il faut le second principe pour connaître l'évolution effectivement choisie.

Remarques

Le premier principe peut être vu comme le “principe d'équivalence du travail et de la chaleur”. Historiquement, il s'agissait de rétablir la conservation de l'énergie en considérant la chaleur comme une forme d'énergie, convertible en travail et vice-versa.

Définitions

Équilibre thermodynamique : les variables d'état n'évoluent pas dans le temps, même si on isole le système de l'extérieur (BFR, Diu) ou si on le coupe en deux.

Conséquences :

- Il en est de même pour toutes les grandeurs d'état, puisque par définition elles s'expriment en fonction des variables d'état.
- Un système avec des flux n'est pas à l'équilibre (courant électrique, flux de chaleur, ..., par exemple une barre de fer avec des extrémités à des températures différentes, ou une résistance parcourue par un courant), puisque si on isole ce système il évoluera (car en l'isolant on coupe le courant ou le flux de chaleur).
- L'atmosphère isotherme est à l'équilibre thermodynamique (bien que $n(z)$ ou $P(z)$ dépende de l'altitude), car il n'y a aucun flux, le flux diffusif de particules étant compensé par celui dû à la gravité.
- Un système à l'équilibre thermodynamique *n'a plus aucune mémoire* de la façon dont il a été “fabriqué”. Du verre (ou une solide amorphe en général) n'est pas à l'équilibre thermodynamique, car il coule (non stationnaire) et car ses propriétés dépendent de sa fabrication. Idem pour tout métal “trempé” ou autre qui possède des propriétés thermoélastiques qui dépendent de son usinage.
- Dans les cas de systèmes thermoélastiques uniquement, pas de flux de chaleur est équivalent à une température uniforme. Est-ce que c'est le cas en général? Je ne sais pas. On peut penser au cas d'un matériau conducteur en présence d'un potentiel, où l'on a des relations du type (voir aussi 92 pour des détails)

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_q &= L_{11} \nabla(1/T) - (L_{12}/T) \nabla V \\ \mathbf{j} &= L_{21} \nabla(1/T) - (L_{22}/T) \nabla V \end{aligned} \quad (4.1)$$

mais si le déterminant de l'équation est non nul (et je ne vois pas pourquoi il serait nul), alors l'équilibre thermodynamique implique $\mathbf{j}_q = 0$ et $\mathbf{j} = 0$ qui implique que les gradients sont nuls : T est uniforme dans ce cas là aussi.

Évolution quasi-statique : Transformation pour laquelle le processus (imposé) de variation des paramètres est lent devant les processus (spontanés) d'établissement de l'équilibre.

On peut dire qu'alors la transformation est définie par une succession d'équilibres thermodynamiques.

Ainsi, les variables thermodynamiques sont définies à tout temps.

Remarque : on n'a en fait pas forcément strictement succession d'équilibre thermodynamique. Par exemple dans l'étude d'un cylindre fermé par un piston de masse M , sur lequel on place brutalement une masse m , la transformation peut être qualifiée de quasi-statique si $m \ll M$ (en fait rigoureusement si la vitesse du piston est \ll vitesse du son), car dans ce cas la pression au sein du gaz est uniforme ou presque (cf simulations, BUP 879) ; pourtant le piston bouge et il n'y a donc pas équilibre mécanique.

Transformation réversible : QS telle qu'à tout instant, $P = P_e$, $T = T_e$, etc, où e signifie le milieu extérieur. Une variation infinitésimale des paramètres externes peut alors faire évoluer le système en sens inverse. (C'est la définition de Diu.) Plus formellement, c'est équivalent à une entropie créée nulle.

On peut trouver une discussion sur la définition de la réversibilité dans le BUP 851. L'auteur propose comme définition qu'il s'agit "du fait de considérer ensemble et dans un certain ordre une continuité d'état d'équilibre du système étudié". Il ne s'agit alors pas d'une transformation, car s'il y a transformation il y a irréversibilité ! Il s'agit plutôt de penser à, de considérer, une succession d'états d'équilibre les uns à côté des autres.

La notion de quasi-statique ne concerne que le système. La notion de réversible concerne à la fois le système et le milieu extérieur.

Pour un système isolé, quasi-statique \Leftrightarrow réversible. Dans le cas général d'un système non isolé, une transformation réversible est quasi-statique. L'inverse n'est pas forcément vrai, mais certains exemples évoqués dans les livres de prépa sont faux. Par exemple, deux solides de différentes températures mis en contact par un fil, aussi fin soit-il, ne subissent pas une transformation quasi-statique : il y a toujours un flux thermique dans le fil conducteur et le fil est donc toujours hors-équilibre, de plus il n'y a aucune échelle de temps devant laquelle le temps de relaxation vers l'équilibre peut être lent (ce qui est nécessaire pour être quasi-statique). (En revanche, le solide 1 seul peut être considéré comme évoluant de façon QS, le solide 2 aussi, mais pas l'ensemble.) Un bon exemple est plutôt un gaz dans un piston avec du frottement solide entre le piston et le cylindre, ou la déformation plastique mais infiniment lente d'un solide, ou les versions quasi-statique des détentes de Joule-Thomson et Joule-Gay-Lussac (même si elles sont un peu artificielles) : tous ces exemples peuvent être conduits de façon quasi-statique tout en restant irréversibles.

Le travail des forces de pression est $\delta W = -P_e dV_{\text{balayé}}$ avec P_e la pression extérieure (qui peut inclure autre chose que la pression de l'air, par exemple un terme mg/S s'il y a une masse m posée sur le piston), et $V_{\text{balayé}}$ le volume balayé par l'enceinte.

— En général et sauf dans des cas étranges, la variation du volume balayé est égale à la variation du volume du gaz (voir Sanz 1ère année 3ème édition p.844 pour un contre exemple).

- Pour une évolution réversible, on a $P = P_e$, et donc $\delta W = -PdV$. Pour une évolution quasi-statique, ce n'est pas toujours le cas (piston avec frottement, ou Joule Gay-Lussac où $P_e = 0$ alors que $P \neq 0$). Pour une évolution quasi-statique, il faut donc voir au cas par cas si $P = P_e$ ou non.
- En toute rigueur, ce n'est pas le travail reçu par le système contenu dans l'enceinte, mais le travail reçu par le système {système dans l'enceinte (du gaz par exemple) + l'enceinte + le piston}. Or dans l'application du premier principe on néglige toujours la variation d'énergie interne et cinétique de l'enceinte et du piston, et c'est donc le travail reçu par le système contenu dans l'enceinte. Mais attention si on veut faire une démonstration rigoureuse. Voir encore une fois Sanz.

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

Jury :

Donner des exemples ; *nécessaire* de montrer qu'on peut extraire un travail ; interprétation statistique des potentiels thermodynamiques.

Plan

Bibliographie :

- Choimet, Précis Bréal : le livre de la leçon.
- Sanz PC ancien programme (la bouteille d'air comprimé).
- Sanz PC nouveau programme.
- Cengel, Thermodynamique, une approche pragmatique (pour des détails sur l'exergie au cas où).
- Diu thermodynamique.

Niveau L2, pré-requis :

- Second principe.
- Tension de surface.

Introduction

But : prédire le sens d'évolution spontanée d'un système, ainsi que le travail maximal extractible sans violer le second principe.

I - Application du second principe à l'évolution des systèmes isolés

(Choimet pour tout)

On a déjà vu le second principe, avec le côté postulat, entropie, fonction caractéristique, etc... Ici, on va voir qu'il permet de prédire le sens de l'évolution d'un système.

- 1 **Analogie mécanique** : on cherche un équivalent en thermodynamique.
- 2 **Rappel du 2nd ppe.** (transparent si c'est un rappel)
- 3 **Application à la détente de Joule-Gay Lussac** : $S(U; V)$ est un potentiel (U constant paramètre de contrôle, V variable interne).
- 4 **Définition** : variables internes X_i , paramètres de contrôle C_i , potentiel $F^*(C_i; V_i)$ minimal à l'équilibre par rapport aux variables internes.

L'entropie fonctionne pour un système isolé. Et sinon ?

II - Condition d'équilibre des systèmes non isolés

(Choimet pour tout)

On cherche des potentiels pour l'évolution de systèmes fermés ne recevant pas de travail utile ($W' = 0$).

- 1 **Contact avec un thermostat** : F^* .

On trouve que les évolutions possibles entre deux états i et f pour un système fermé au contact d'un thermostat doivent vérifier $F^*(f) - F^*(i) \leq 0$. Les états i et f ne sont pas

forcément tels que le système soit à l'équilibre avec le thermostat. Sa température peut être différente (par exemple l'évolution d'un fluide caloporteur au contact d'une source chaude, qui n'atteint pas T de la source). Le système lui-même est toutefois à l'équilibre (mais pas avec l'extérieur), pour pouvoir travailler avec de la thermodynamique.

À l'équilibre, $dF^* = 0$.

Écrire dF^* montre qu'on minimise par rapport à S : $0 = (\partial F/\partial S)_T = T - T_0$.

2 Condition de stabilité (si temps) : $C_v > 0$. Suivre Diu thermodynamique.

3 Contact avec un thermostat et un barostat : G^* .

A chaque fois, on a les paramètres de contrôle de façon évidente. Les variables internes par rapport auxquels on minimise se déterminent en exprimant dF^* (ou dG^*).

4 Cas de la bulle (Choimet, attention erreur : $A = 2 \times 4\pi r^2$ et donc $2 \times 2\sigma/R$). On travaille avec $G^*(T_0, P_0; r, S)$.

III - Travail récupérable

Rq : Choimet appelle évolution l'évolution entre deux états quelconques, et transformation une évolution entre deux états d'équilibre (ce qui n'est pas un vocabulaire universel...).

1 Travail maximal utile W

$-W = W_{\text{reçu}} \leq F^*(i) - F^*(f)$ et $W_{\text{reçu}} \leq G^*(i) - G^*(f)$.

Rq : on peut avoir $\Delta F^* > 0$, à condition que $W < 0$, i.e. qu'on fournisse du travail au système. F^* n'est alors plus un potentiel. On a égalité si réversible.

2 Exergie pour un système ouvert dans le champ de pesanteur (Choimet exercice).

Faire les deux applications mentionnées. Le cas du fluide se détendant est ce qui est effectivement exploité dans les turbines.

3 Détente d'une bouteille. (Sanz PC ancienne édition, si temps). On peut faire le cas en contact avec un thermostat (donc on ne prend pas en compte la pression atmosphérique extérieure), ou avec thermostat et barostat (on prend en compte P_0).

Remarques

Un système thermodynamique est caractérisé entièrement par la connaissance d'une équation d'état liant les variables d'état et d'une relation $c_v(T)$.

Signification physique de C_V : quantité de chaleur qu'il faut apporter au système à volume constant pour élever sa température de 1 K.

Fonctions d'état, variables d'état, etc...

Paramètres d'état ou grandeur d'état : caractérisent l'équilibre thermodynamique ($P, T, U, V, S, F, N, \mu, \dots$). Pour une situation donnée, on distingue les paramètres de contrôle (qui sont fixés) et les variables interne (qui sont libres de fluctuer).

Équation d'état : relation liant les paramètres d'état. Par exemple, $PV = NRT$. Elles sont empiriques, ou déduites de la connaissance de la fonction d'état caractéristique.

Variables d'état : jeu indépendant de paramètres d'état. Par exemple, (T, V, N) , ou bien (S, V, N) . Pour un système magnétique, il faut ajouter M_B , la composante du moment magnétique dans la direction du champ magnétique (voir Callen, annexe B). Pour un système électrique, idem avec le moment dipolaire. Etc... Le nombre de variables d'état intensives nécessaires pour déterminer l'état thermodynamique du système est donné par la variance.

Fonction d'état : expression des paramètres d'état en fonction des variables d'état choisies. Par exemple si les variables d'état sont (T, V, N) , des fonctions d'état sont $U(T, V, N)$, $P(T, V, N)$, $F(T, V, N)$, $S(T, V, N)$, $\mu(T, V, N)$, ...

Fonction d'état caractéristique : fonction d'état exprimée en fonction de ses variables naturelles. Elle contient toute l'information thermodynamique sur le système. Par exemple, $S(U, V, N)$, $U(S, V, N)$, $F(T, V, N)$, $H(S, P, N)$, $G(T, P, N)$, $\Omega(T, V, \mu)$, ... Elles sont obtenues l'une par rapport à l'autre par transformée de Legendre.

Variables d'état primitives : U, S, V, N , qui sont définies même hors équilibre thermodynamique (avec la formule $\sum p_l \log p_l$ pour S).

Signification de l'entropie

On pourra consulter l'article du BUP 851, qui démontre l'énoncé "de cpge" (dû à Prigogine en 1950) du second principe ($dS = \delta S_e + \delta S_c$, etc...) à partir du principe d'évolution (qui est sa version du 2nd ppe) : "Tout système isolé, ayant suivi une évolution, ne peut revenir spontanément à son état initial".

En partant de ce principe, il démontre d'abord les énoncés historiques de Carnot, Kelvin et Clausius (avec des systèmes en interaction avec deux sources thermiques et fournissant ou recevant du travail, ie, des machines thermiques). Puis la fonction S est construite en démontrant à partir de l'égalité de Carnot $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = 0$ que pour une évolution réversible d'un système quelconque, on a $\oint \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T} = 0$. La grandeur $\frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T_{\text{ext}}}$ (où T_{ext} est aussi appelé température de la frontière du système, égale à T pour une évolution réversible) est donc une fonction d'état (ou une différentielle exacte), c'est donc que l'on peut définir

$$dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}, \quad (4.2)$$

dont l'évolution est calculable entre deux points A et B par cette formule (en utilisant un chemin réversible).

Il démontre ensuite que cette fonction d'état S est bien extensive, et que pour une transformation non réversible quelconque on peut poser $\delta S_e = \delta Q/T_{\text{ext}}$ et $\delta S_c = dS - \delta S_e$ et que cette dernière a les propriétés voulues.

Pour une transformation quelconque, comme S est une fonction d'état, dS ne dépend que des états initiaux et finaux, et peut donc être calculée en imaginant un chemin réversible. La variation d'entropie est donc encore $dS = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{T}$ (car $T = T_{\text{ext}}$ si réversible).

Il interprète ensuite l'entropie de deux façons éclairantes, en notant que

$$\frac{dS}{k_B} = \frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{\delta Q_{\text{rev}}}{k_B T}. \quad (4.3)$$

Alors, la variation élémentaire d'entropie du système divisée par k_B est égale :

- à la variation relative du nombre de microétats du système (c'est le $S = k_B \ln \Omega$ mais différencié),
- au rapport entre l'énergie thermique reçue de façon réversible et l'énergie thermique déjà présente par degré de liberté ($k_B T$ au facteur $1/2$ près).

Interprétation statistique de l'entropie

Dans l'ensemble microcanonique (donc en fait si on considère un système isolé, dont l'énergie totale E ne varie pas) : $S = k_B \ln \Omega$, avec Ω le nombre de microétats dont l'énergie totale est E . On a donc $\Omega(S, V, N)$ ou $\Omega(E, V, N)$.

On dit que lorsqu'un système isolé évolue d'un état d'équilibre à un autre (suite au relâchement d'une contrainte, par exemple on brise une paroi dans la détente de Joule-Gaylussac), alors son entropie ne peut qu'augmenter. Dans la version statistique $S = k_B \ln \Omega$, ceci se traduit par l'énoncé suivant : "l'état macroscopique observé est celui pour lequel le nombre de microétats correspondants est le plus grand." La question est de savoir si cette version statistique du second principe est plus "intuitive" ou "compréhensible" pour les étudiants.

La réponse est en partie oui. Considérons l'exemple de la détente de Joule-Gaylussac, où le volume accessible au gaz double. De manière générale, il faut bien ajouter le postulat que tous les microétats (dont l'énergie est E) sont équiprobables. Il n'y a en effet pas de raison de privilégier par exemple un microétat où toutes les molécules de gaz sont à gauche de la boîte par rapport à un microétat où elles sont réparties partout. *Non, ce qui va distinguer ces deux microétats, c'est que le nombre de microétats "toutes à gauche" est très inférieur par rapport au nombre de microétats "réparties partout". Ainsi, la probabilité de tomber sur un des microétats "toutes à gauche" est infime. Par contre on tombera facilement sur un des très nombreux microétats "réparties partout". Et le macroétat observé – le plus probable donc – est finalement celui qui est réalisé par un nombre maximal de microétats : donc celui pour lequel Ω est maximal.*

Dans l'exemple de la détente où le volume double, il y a deux fois plus de microétats possibles où les particules occupent un volume V par rapport aux possibilités offertes par l'occupation d'un volume $V/2$. Tomber sur un tel microétat est donc plus probable. D'ailleurs, l'entropie est en $S = Nk_B \ln V$, et donc $\Omega \propto V^N$. Ainsi S , et Ω , et V occupé sont donc maximaux.

Voir aussi Sanz, PCSI, p.905 et suivantes. Il y est utilisé le point de vue du dénombrement lorsque l'on sépare le volume en deux.

Enfin, si on met des chiffres sur tout ceci, ils sont écrasants : probabilités en $\frac{1}{2^N}$ avec $N = 10^{23}$...

Second principe et entropie échangée

$\delta S_e = \frac{\delta Q_{\text{reçu}}}{T_{\text{fr}}}$ avec T_{fr} la température de la frontière entre les deux systèmes, entre lesquels l'échange de chaleur a lieu.

Par définition, T_{fr} est la même pour les deux systèmes. Ainsi on a bien $\delta S_{e,1 \rightarrow 2} = \frac{\delta Q_{1 \rightarrow 2}}{T_{\text{fr}}} = -\frac{\delta Q_{2 \rightarrow 1}}{T_{\text{fr}}} = -\delta S_{e,2 \rightarrow 1}$

Notons que cette température de frontière n'est pas toujours clairement définie. On se passe alors d'exprimer l'entropie échangée en 1 et 2. À la place on peut utiliser $dU = TdS - pdV$, ou bien on raisonne sur le système totale $\{1+2\}$. C'est ce qu'on fait par exemple lors du calcul de l'entropie créée lors de la thermalisation de deux solides initialement à des températures différentes.

Le seul cas où T_{fr} est clairement connue est lors de l'échange avec un thermostat : par hypothèse c'est la température du thermostat.

Voir aussi Olivier et Gié, chapitre 4.

Second principe et possibilité de rendre des transformations réversibles

Toutes les transformations deviennent pas réversible à la limite de changements infiniment lents.

Pour que ce soit le cas, il faut que l'entropie créée lors d'un petit changement d'un paramètre extérieur dx soit un ordre 2 en dx , alors que les échanges d'énergie sont d'ordre 1.

Exemple : lors de la mise en contact d'un objet à la température T avec un thermostat à $T + dT$, on montre que $\delta S_c \propto \left(\frac{dT}{T}\right)^2$, alors que δQ et $\delta S_e \propto dT$. (Voir Sanz pcsi)

Ou bien lors de l'ajout d'une masse dm sur un piston et une évolution monotherme, on a $\delta S_c \propto \left(\frac{dm}{m}\right)^2$ alors que $\delta Q \propto dm$ et qu'on a augmenter la masse de dm . (Voir Sanz pcsi)

Ceci permet de réaliser les transformations assez lentement pour rendre négligeable la création d'entropie, mais de les réaliser tout de même. Pour citer Bruhat p. 111 : "c'est cette tolérance d'écart de températures infiniment petits qui, sans porter atteinte à la réversibilité des phénomènes, permet d'édifier une 'thermodynamique des phénomènes réversibles' sans la réduire à une 'thermostatique' condamnée à l'immuabilité".

C'est impossible pour certaines transformations : lorsqu'il y a du frottement solide, ...

Thermostat

Un thermostat est un corps dont la capacité thermique est infinie, qui n'échange de l'énergie que par transfert thermique, et dont la conductivité est infinie.

Notons T_0 la température du thermostat, et $_0$ toutes les grandeurs le concernant. Conséquences :

- Sa température reste constante (C_0 infinie) et uniforme (λ_0 infinie).
- En particulier lors d'un transfert thermique avec un corps extérieur S , la température de la frontière entre les deux est égale à la température du thermostat. C'est pourquoi on écrit toujours, pour S , que $\delta S_e = \frac{\delta Q_S}{T_0}$.
- Son volume ne varie pas (sinon c'est qu'il échange du travail $-pdV$).
- L'évolution du thermostat est réversible : $dU_0 = T_0 dS_0$ et $dU_0 = \delta Q_0$, donc $dS_0 = \frac{\delta Q_0}{T_0} = \frac{\delta Q_0}{T_{\text{frontière}}} = \delta S_{e,0}$.

Voir Sanz PCSI ancien programme pour un bilan (1er et 2nd ppe) sur un thermostat + système en contact.

Voir BUP 879, Rouaud, pour une discussion de l'idéalité d'un thermostat.

Unités et constantes fondamentales

Nombre d'Avogadro : Avant 1905 et les mesures de Na par Jean Perrin sur les suggestions d'Einstein, on n'avait aucune idée de combien il y a d'entités (atomes ou molécules) dans tel volume de gaz à T et P donné. On n'avait d'ailleurs toujours pas prouvé la thèse atomique. Après ses mesures, on a su qu'il s'agissait d'environ 6×10^{23} pour 24 L à 20 degrés sous 1 bar. Je ne trouve pas que ça n'a aucun intérêt physique ! Et le fait que Jean Perrin ait mesuré Na de 36 façons différentes prouve bien que ça a un sens physique.

Constante de Boltzmann : k_B est un facteur de conversion Joule/Kelvin. On pourrait définir $T' = k_B T$ (en joule), $S' = S/k_B$ (en bit), et k_B disparaît. C'est un peu analogue à l'époque où il y avait les calories et les joules, et un facteur de conversion $J = \dots \text{J/cal}$ qui était tabulé. Et qui a disparu.

De façon générale, ce n'est pas parce qu'il existe une redéfinition du système d'unité dans lequel une constante vaut 1 que cette constante n'a pas de sens physique. On peut faire un choix d'unités où $G = c = \hbar = 1$, pourtant on ne va pas songer à évoquer l'absence de sens physique de ces dernières ! Il est important de comprendre, je pense, que la valeur numérique d'une constante physique dépend du système d'unité et n'est donc pas si importante, contrairement à l'existence et au rôle que joue cette constante, qui peut être très "physique".

De même, ce n'est pas parce qu'un système d'unités donné fixe une constante par définition que cette constante n'a pas de sens physique. Exemple de la vitesse de la lumière. Exemple aussi : on peut choisir de fixer arbitrairement un certain nombre de constantes, tant qu'on n'a pas quelque chose de surcontraint. Mais sans préjuger du sens physique de celles-ci.

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

Jury :

De vrais exemples, discuter la modélisation vers le cycle idéalisé (pour le moteur 4 temps par ex.), discuter les sources d'irréversibilité (gradients de T et n , ...).

OG partout.

Plan

Bibliographie :

- **Sanz** PC nouveau programme : machine frigorifique.
- **Cap Prépa** PC : machines thermiques, compromis puissance/rendement.
- Cap Prépa PCSI : compléments.
- **Cengel**, Thermodynamique, une approche pragmatique : moteur de Stirling et 4 temps.
- Diu thermodynamique.
- BUP 864 : moteur de Stirling.
- **H-prépa** thermodynamique 1ère année : diagramme de Raveau, bon complément.

Niveau L2, pré-requis :

- Premier et second principe.

Manip : Montrer le moteur de Stirling.

Introduction

La thermodynamique a été, historiquement, élaborée pour concevoir et optimiser des moteurs.

OG : énergie pour lever 1 kg de 100 m, par rapport à l'énergie libérée par le refroidissement de ... d'où l'intérêt d'exploiter la puissance du feu. De même, exploiter les changements d'état permet plus d'échange d'énergie que d'utiliser des détentes ou compressions.

Manip : mettre en route le moteur de Stirling. On ne le détaillera pas (on expliquera plutôt le moteur 4 temps, beaucoup plus utilisé). Juste donner le principe : on promène un gaz entre une source froide et une source chaude.

I - Généralités sur les machines thermiques

1 Inégalité de Clausius et diagramme de Raveau

Le ditherme permet de tout faire.

2 Rendement du cycle de Carnot réversible

Démonstration de η pour une évolution ditherme.

3 Puissance

Aire du cycle dans le diagramme.

Compromis entre puissance et rendement : le cycle réversible est infiniment lent, donc de puissance nulle (Cap Prépa PC).

II - Moteurs

Le moteur à explosion 4 temps (Otto).
Suivre complètement le “Thermodynamique, une approche pragmatique” (Cengel). Voir aussi Cap Prépa PCSI. Donner des OGs de l'exemple de Cengel.

III - Réfrigérateur

Sanz nouvelle édition : cycle réel avec le vrai fluide. Ou dans d'autres ouvrage plus récents.

Remarques

Attention à toujours bien définir le système auquel on applique les principes. Par exemple pour le fluide effectuant un cycle (système fermé), ou bien pour le fluide dans le détendeur (système de type ouvert), ...

Rappel : variance (ie nombre de paramètres intensifs indépendants) d'un corps pur sous une phase : 2 ; d'un corps pur à l'équilibre diphasique : 1 ($v = 3 - \phi$ pour un corps pur).

Cycle de Carnot

Cf Cap prépa 2ème année.

Le cycle de Carnot n'est en fait jamais réalisé avec un GP pour deux raisons : (i) un travail significatif par cycle n'est obtenu que si l'on pousse le fluide/gaz dans des domaines extrêmes, qui abîment les machines (le montrer pour le cas du GP : PV et PV^γ) ; (ii) les transformations isothermes sont très lentes.

On peut faire mieux pour un cycle de Carnot en utilisant un fluide passant entre plusieurs états, car alors le changement d'état est isotherme mais rapide.

Il reste des problèmes avec Carnot : on préfère faire marcher la turbine en phase sèche (Carnot : phase humide, cavitation, dégât...); les compresseurs de mélanges diphasiques sont compliqués, on préfère une pompe pour compresser un liquide seul.

Vers les cycles de Rankine et de Hirn.

Rendements

Le rendement défini comme $\eta_1 = P_{\text{utile}}/P_{\text{fourni}}$ traduit la quantité d'énergie récupérée par rapport à celle injectée. Il est ≤ 1 d'après le premier principe. Le rendement $\eta_1/\eta_{\text{Carnot}}$ traduit la quantité d'énergie récupérée par rapport à la quantité d'énergie récupérable. Il est ≤ 1 d'après le second principe.

Utilisation conjointe des relations pour un système fermé (identité thermo, Laplace) et pour un système ouvert

- **Premier principe pour un écoulement** : $\Delta h = w_i + q$. Il s'applique entre l'entrée et la sortie d'un système ouvert en régime stationnaire : $\Delta h = h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}}$.
- **Premier principe pour un écoulement version infinitésimale** : $dh = \delta w_i + \delta q$. Il s'applique entre deux points proches (x et $x + dx$) d'un écoulement en régime stationnaire : $dh = h(x + dx) - h(x)$.

Cela suppose donc le fluide en écoulement stationnaire en tout point x de l'écoulement, et suffisamment à l'équilibre en tout point x pour pouvoir y définir les grandeurs considérées ($h(x)$, $T(x)$, $p(x)$, définies sur un volume mésoscopique).

— **Identités thermodynamiques ou la loi de Laplace pour un écoulement :**

Les identités thermodynamiques ou la loi de Laplace sont valables pour un système fermé. Or on les utilise aussi parfois entre l'entrée et la sortie d'un système ouvert.

C'est correct si on les écrit en variables intensives, et si le régime est stationnaire.

En effet, le régime stationnaire permet en effet de confondre variation $dh = h(t + dt) - h(t)$ lorsque l'on suit une particule de fluide (système fermé), et variation $dh = h(x + dx) - h(x)$ entre deux points fixes de l'écoulement (points d'entrée et de sortie d'un système ouvert). (Et de même pour toute autre grandeur intensive.)

Démonstration : on applique l'identité thermodynamique à une particule de fluide (système fermé) évoluant entre les abscisses x et $x + dx$ entre les temps t et $t + dt$. Ceci relie alors ce qu'il se passe pour les grandeurs intensives mises en relation entre les abscisses x et $x + dx$ (car ce sont toujours les mêmes particules de fluide qui passent).

— **Système en écoulement et tracé du fonctionnement dans un diagramme :**

T - s , ou p - v par exemple, quoiqu'il en soit il faut des grandeurs intensives si le système est en écoulement.

Ce que l'on trace est l'état du fluide à mesure qu'il s'écoule dans le système. Notons que :

— On suppose donc implicitement qu'on peut paramétrer l'écoulement par une variable x , et qu'en un point x de la machine on peut définir $p(x)$, $v(x)$, $s(x)$, etc (ce qui est un peu exagéré par exemple à l'intérieur d'un compresseur ou d'une turbine).

— Le fonctionnement n'est pas forcément strictement stationnaire. Il l'est pour un détenteur ou un échangeur thermique (en un point x il se passe toujours la même chose), mais pas en tout point x d'un compresseur puisqu'il y a des étapes bien distinctes (admission puis fermeture des soupapes, compression avec les soupapes fermées, ouverture soupape puis refoulement), qui se succèdent et se répètent.

Ce n'est toutefois pas gênant pour appliquer le premier principes entre la sortie et l'entrée d'un tel dispositif, où on a stationnarité (en fin presque, en sortie du compresseur il n'y a pas exactement stationnarité mais une légère périodicité liée à la répétition des compressions, mais on supposera que les grandeurs moyennes représentent bien l'écoulement).

On peut appliquer le premier principe version écoulement sur une étape du cycle (par exemple entre entrée et sortie de la turbine), mais il faut bien comprendre qu'on fait alors intervenir le travail indiqué w_i , qui est le travail reçu par le fluide de la part des parties mobiles de la machine, et qui exclu les travaux amont et aval des forces de pression. Les étapes d'admission et de refoulement sont donc déjà implicitement prises en compte dans ce premier principe dans le terme $\Delta h = h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}}$ (cf sa démonstration : pour faire intervenir h on utilise les pressions amont et aval). Comme déjà souligné, les valeurs qui interviennent sont des valeurs moyennes sur un cycle, car les ouvertures/fermetures de clapets font que le régime n'est pas tout à fait stationnaire.

Il faut voir dans le détail le fonctionnement de la machine ou le modèle de fonctionnement utilisé, ce dernier pouvant exclure l'utilisation du premier principe pour un écoulement (dans le modèle du cycle de Beau de Rochas par exemple, on a uniquement des étapes avec un système fermé) (dans un compresseur avec piston et clapets, c'est un peu plus subtil).

Prenons l'exemple d'un compresseur avec $A \rightarrow B$ =admission, fermeture des clapets, $B \rightarrow C$ =compression (dans un cylindre fermé, donc système fermé), ouverture des clapets, $C \rightarrow D$ =refoulement.

On peut voir le compresseur “de l’extérieur”, sans s’intéresser aux étapes qui s’y déroulent, comme un système ouvert d’entrée A et de sortie D . Le premier principe pour un écoulement entre A et D (en supposant les phases d’admission et de refoulement isothermes) donne $w_i = h_D - h_A = c_p(T_C - T_B) = c_p T_B \left(\frac{T_C}{T_B} - 1 \right) = c_p T_B (x^{1-\frac{1}{\gamma}} - 1)$, où on a posé $x = p_C/p_B$ et supposé pouvoir utiliser la loi de Laplace.

On peut ensuite regarder “dans” le compresseur. Si on calcule le travail reçu par le fluide en considérant la transformation $B \rightarrow C$ du système fermé {gaz dans le cylindre}, on trouve avec le premier principe pour un système fermé un travail massique reçu par le fluide $w_{C \rightarrow B} = u_C - u_B = c_v(T_C - T_B) = c_v T_B (x^{1-\frac{1}{\gamma}} - 1)$. Ceci est différent du travail indiqué d’un facteur $c_p/c_v = \gamma$ (voire encore plus si l’admission et le refoulement ne sont pas isothermes). C’est normal car le travail indiqué est le travail que doit fournir la partie mobile (le piston) seule, en incluant la contribution positive ou négative du fluide amont et aval sur le fluide comprimé. En effet, lors de l’étape d’admission il y a un certain travail reçu par le piston, et de même lors de l’étape de refoulement, qui ne sont pas pris en compte dans ce $w_{B \rightarrow C}$ (qui considère l’évolution $B \rightarrow C$ d’un système fermé, il faudrait ajouter à ce travail les travaux $w_{A \rightarrow B}$ et $w_{C \rightarrow D}$).

→ La bonne méthode, pour avoir le travail massique indiqué (réellement fourni par le piston) est bien d’utiliser le premier principe pour l’écoulement entre A et D .

— Et dans le cas d’un cycle :

Prenons un système pour lequel il y a un sens à considérer que chaque étape est un système en écoulement.

Dans le cas d’un cycle on a bien $w_{\text{cycle}} = w_{i,\text{cycle}}$.

En effet, on peut écrire le premier principe pour le système fermé {tout le fluide} sur un ou plusieurs cycles :

$$0 = \Delta U = W_{\text{cycle}} + Q_{\text{cycle}}, \quad \text{ou avec les grandeurs massiques } 0 = w_{\text{cycle}} + q_{\text{cycle}},$$

et on peut aussi appliquer le premier principe pour un écoulement à chaque organe de la machine (au compresseur, au détenteur, aux échangeurs, ...) : on a une suite de relation du type

$$h_2 - h_1 = w_{i12} + q_{12}, \quad h_3 - h_2 = w_{i23} + q_{23}, \quad \dots$$

et en les sommant toutes, comme il s’agit d’un cycle, on a

$$0 = h_1 - h_4 + h_4 - h_3 + h_3 - h_2 + h_2 - h_1 = \text{somme des } w_i + \text{somme des } q = w_{i,\text{cycle}} + q_{\text{cycle}}.$$

On a donc la somme des w_i (soit $w_{i,\text{cycle}}$) qui est égale à w_{cycle} . (Sous réserve que l’on puisse plus ou moins considérer les différentes étapes comme des écoulements.)

On remarque bien que le fait qu’il s’agit d’un cycle est essentiel pour abolir la différence entre h et u , car les variations de chacun sur le cycle sont nulles (et donc égales!). Plus physiquement, on peut probablement dire que les travaux d’admission et de refoulement se compensent strictement sur l’ensemble car il s’agit d’un fonctionnement en cycle.

Mais attention toutefois à ne pas mélanger, dans le même raisonnement, travail w et travail indiqué w_i .

— Interprétation de l’aire du cycle :

- On démontre facilement que pour un système fermé dont l’évolution est telle que p et v soient uniformes et définis à chaque instant, et telle que $p = p_{\text{ext}}$ (donc par exemple si l’évolution est réversible, ou si elle est quasi-statique et sans frottements), on a : $A_{12} = -w_{12}$, et par sommation $A_{\text{cycle}} = -w_{\text{cycle}}$. (A_{12} signifie aire sous la courbe entre étapes 1 et 2.)

On peut appliquer ceci strictement à un système qui est resté fermé avec p , v uniformes à chaque instant, donc par exemple à un gaz dans un cylindre (modèle du moteur de Stirling

par exemple) , mais pas a un système dont chaque étape est un écoulement, puisqu'on ne peut plus parler de p ou de v pour tout le système (cycle de Rankine par exemple).

Que peut-on alors dire pour un système en écoulement dont on trace le diagramme $p-v$ (au sens du point précédent) ?

- On peut considérer une particule de fluide, de masse m , que l'on suit dans son mouvement à mesure qu'elle parcourt le système. C'est un système fermé. On suppose l'écoulement suffisamment à l'équilibre pour pouvoir définir sa pression et son volume massique à chaque instant. Le travail reçu par cette pdf est $\delta W = -pdV$ avec dV la variation de son volume (travail exercé soit par le fluide qui l'entoure, soit par l'action d'une paroi mobile ou non), soit encore en divisant par la masse de la pdf $\delta w = -pdv$. On a donc, pour une étape $1 \rightarrow 2$, un travail reçu par la pdf, et donc par unité de masse du fluide : $w_{12} = -\int_1^2 pdv$. C'est le même résultat que pour un système fermé évoluant d'un état 1 à un état 2.

Enfin, en sommant sur toutes les étapes du cycle, on a $w_{\text{cycle}} = -A_{\text{cycle}}$.

- C'est donc bien le travail que l'on obtient, et non pas le travail indiqué. On peut obtenir le travail indiqué, mais on montre alors que le travail indiqué $w_{i,12}$ reçu par le fluide (de la part des parties mobiles) lors d'une évolution réversible est égal à $\int vdp$, donc à l'aire entre la courbe et l'axe des ordonnées !

Démonstration du résultat $w_i = \int vdp$:

On considère un fluide en écoulement, dont on trace l'état (intensif) à mesure qu'il s'écoule, dans un diagramme $p-v$. Ceci suppose qu'il soit suffisamment à l'équilibre tout au long de l'écoulement pour que l'on puisse définir les variables thermodynamiques et appliquer les différents principes. On supposera en plus l'évolution réversible pour utiliser $\delta s_c = 0$ et $T = T_{\text{ext}}$. On suppose enfin qu'il n'y a pas de variations d'énergie cinétique ou potentielle.

On suppose en plus l'écoulement stationnaire.

Le second principe version écoulement entre deux abscisses x et $x + dx$ de l'écoulement s'écrit

$$ds = \delta s_e + \delta s_c = \frac{\delta q}{T} + 0, \quad \text{soit encore } \delta q = Tds.$$

La seconde identité thermodynamique s'applique pour l'évolution d'un système fermé (une particule de fluide) :

$$dh = Tds + vdp.$$

Le régime étant stationnaire, les particules de fluide font toujours la même chose, et cette identité relie donc également la variation des grandeurs concernées entre deux abscisses x et $x + dx$.

On a donc $dh = \delta q + vdp$.

Enfin, le premier principe pour un écoulement indique que

$$dh + de_c + de_p = \delta q + \delta w_i.$$

On a donc ici $dh = \delta q + \delta w_i$, soit encore $\delta q + vdp = \delta q + \delta w_i$, soit encore $\boxed{\delta w_i = vdp}$.

Pour une évolution entre A et B , on a donc $\boxed{w_{i,AB} = \int_A^B vdp}$.

Cela dit pour un cycle, la somme des aires algébriques entre la courbe et l'axe des ordonnées est égale à l'aire du cycle. On a donc en fait $w_{i,\text{cycle}} = -A_{\text{cycle}}$.

Rien de surprenant ici, puisqu'on a expliqué précédemment que pour un cycle $w_{i,\text{cycle}} = w_{\text{cycle}}$ d'une part, et que $w_{\text{cycle}} = -A_{\text{cycle}}$ d'autre part.

LP 14 – Transitions de phase

Jury :

Ne pas se limiter à solide-liquide-gaz. C'est une étude thermodynamique. Bien comprendre l'intérêt de l'enthalpie libre. Utiliser les potentiels thermodynamiques pour prédire l'équilibre, mais aussi le sens d'évolution d'un mélange diphasé hors équilibre, et interpréter le diagramme des états. Donner des OG, des phénomènes quotidiens (transpiration, ...).

Plan

Bibliographie :

- Choimet, Précis Bréal, Thermodynamique : pour tout.
- Diu, Thermodynamique : très bon sur le sujet.
- Taillet, dictionnaire de la physique : pour des définitions.

Niveau L2, pré-requis :

- Description thermodynamique des corps purs.
- Description phénoménologique des transitions de phases liquide-solide-vapeur, diagrammes PT et Pv.
- Potentiels thermodynamiques.

Introduction

Manip : faire la courbe de refroidissement de l'eau (mettre un tube à essai d'eau distillée dans un mélange eau-glace à -15°C et suivre la température sous Latis-Pro).

(Choimet) Un corps pur peut se présenter sous diverses phases. On a analysé ces phases lorsqu'elles sont seules. On a décrit les transitions (on a vu par ex. les diagrammes PT et Pv).

Projeter un diagramme PT de l'eau, et un Pv.

Ici, on étudie le passage d'une phase à l'autre, et les conditions permettant leur coexistence, à l'aide des potentiels thermodynamiques.

I - Évolution d'un corps pur sous deux phases : le cas liquide-solide-vapeur

Suivre Choimet.

1 Choix des potentiels thermodynamiques

Système, variables internes et externes, on prend l'enthalpie libre, ...

2 Condition d'équilibre

On trouve $g_1(T, P) = g_2(T, P)$. Donc aussi $P = P(T)$ à l'équilibre : justifie l'existence du diagramme PT.

Cas du point triple.

Prendre le cas d'une compression à T fixé : l'indifférence de G vis à vis de x_1 , et $P(T)$, justifie le palier du diagramme Pv.

3 Évolution d'un mélange diphasé

On évolue vers une seule phase si T et P imposés tels que $g_1 \neq g_2$. Prédiction du sens d'évolution. Critère sur P et P_{sat} .

Application : évaporation (séchage du linge, sèche cheveux). Voir Diu, supplément pour plus de détails. Attention, on raisonne avec la pression partielle en H_2O , car pour un mélange de GP le potentiel thermodynamique fait intervenir la pression partielle. Ainsi, à P ,

T fixés, si $P_{\text{partiel}} < P_{\text{sat}}$, on a un système hors équilibre qui évolue vers l'état monophasé vapeur. Introduire le **taux d'hygrométrie**. L'évaporation a lieu en surface et à toute température, c'est à distinguer de l'ébullition qui a lieu en volume et par exemple à 100°C sous 1 atm.

4 Enthalpie de changement d'état

Application : transpiration, ... machines thermiques, ODG : c'est $\gg E_{\text{p,pes}}$ (cf Diu). Faire la **manip** du thermomètre dans du coton mouillé.

5 Formule de Clapeyron

Démo, interprétation des pentes dans le diagramme PT. Cas de l'eau et du bismuth. Point triple.

Applications : cocotte-minute, eau bouillante et cuisine à l'aiguille du midi, ...

II - Une transition du second ordre : la transition para-ferro

Suivre Diu (ou Choimet). Approche de Landau, où on se donne $F(M, T) = F_0 + a(T)M^2 + \dots$ (qui en fait se démontre en physique statistique par l'approximation de champ moyen sur l'hamiltonien de Heisenberg).

Manip du clou chauffé.

Conclusion et ouverture

Métastabilité (retard à la transition dû à la nucléation). Recalescence. Modèle de VdW.

Remarques

Si ça paraît trop court, on peut parler du modèle de VdW, ou de la nucléation.

Divers

Un changement d'état d'un corps pur n'a pas nécessairement lieu à température et pression constante. C'est le cas si l'un des deux est constant (car on a une relation $P(T)$ lors de la coexistence des phases). Mais on peut envisager par exemple de mettre une goutte de liquide dans une enceinte calorifugée initialement sous pression très réduite : il va y avoir vaporisation, et le gaz va faire augmenter la pression. La température augmentera aussi. Dans ce cas là, le changement d'état est isochore, et on a $Q = \Delta U$ et non pas ΔH .

Exemple concret : l'expérience du bouillant de Franklin.

Transition ferro/para

Voir Diu thermodynamique et physique statistique.

- Elle est du second ordre en champ nul.
- Lorsqu'elle a lieu en champ B non nul et constant, par une augmentation ou diminution de la température au delà ou en deçà de T_c (comme dans la manip du clou chauffé au chalumeau), il n'y a en fait pas de transition. En effet, le paramètre d'ordre M (l'aimantation) reste non nul même au delà de T_c .
- Modèle de Landau : en champ nul, S continue, C_p discontinue. En champ non nul, on peut calculer la susceptibilité magnétique ($\chi = (\partial M_{eq} / \partial H)_T$). On trouve que l'aimantation a toujours une solution non nulle et stable (pour tout T fixée), et que χ diverge en T_c et prend des valeurs finies non nulles de part et d'autre.

- Comparaison entre le modèle de Landau et les expériences : qualitativement ok, mais aucun des exposants critiques n'est bon. On constate bien que M est continue, mais pour $T < T_c$ $M \propto (T_c - T)^\beta$ avec $\beta = 0.35$ (et non $1/2$ comme prédit par Landau) ; $C_p \propto |T - T_c|^{0.1}$ diverge (et donc n'est pas finie) ; $\chi \propto |T - T_c|^\gamma$ avec $\gamma \sim 1.3$ (et non pas 1).

Classification moderne des transitions de phase

Classification actuelle des transitions : transition du premier ordre et transition continue (appelée aussi du second ordre).

Pour une transition du premier ordre : il y a une discontinuité en une dérivé du potentiel (pas nécessairement par rapport à T , donc il n'y a pas nécessairement de chaleur latente), et il y a coexistence entre les deux phases, lors de la transition, sur un domaine de variation des paramètres extérieurs appelé domaine de transition.

Exemples de premier ordre : liquide-gaz, liquide-solide, solide-gaz, solide-solide (entre variétés allotropiques), métal normal-métal supraconducteur en champ B (2nd ordre en champ nul), ferroélectrique-paraélectrique du titanate de baryum.

Pas de point critique pour les transitions solide-liquide et solide-gaz, car on ne peut pas avoir une phase unique avec solide et liquide non distinguables (et encore moins solide et gaz). Voir aussi Choimet : c'est parce que la formule de Clapeyron prédit une pente infinie du fait que l'entropie reste discontinue, alors que la masse volumique ne le serait plus.

Pour une transition du second ordre : l'entropie (qui est une dérivée première du potentiel) est continue : il n'y a pas de chaleur latente, ni coexistence de deux phases. (Ni d'états métastables ?)

Remarque : il existe d'anciennes classifications des transitions de phase, celle de Landau (qui porte sur la continuité ou non du paramètre d'ordre, paramètre qui n'est pas toujours évident à définir), et celle d'Ehrenfest (qui porte sur la continuité des dérivées premières, secondes, ..., du potentiel). Il y a un appendice du livre de Diu (Thermodynamique) qui détaille tout ceci.

Point critique

Au point critique, la transition liquide-gaz est du second ordre. Le phénomène d'opalescence critique observé est dû à l'égalité des masses volumiques des deux phases, et des tensions superficielles. Il se forme, sans coût énergétique, des gouttelettes de gaz dans le liquide et vice-versa, avec une force d'Archimède nulle. De plus, pour une transition continue, la longueur de corrélation diverge et les fluctuations sont importantes à toutes les échelles. Il y a donc des gouttelettes de la taille de λ_{visible} qui diffusent la lumière.

Lorsque l'on passe de liquide à gaz en contournant le point critique, il n'y a pas de transition de phase marquée. On a en fait effectué une transformation où la distance entre les particules varie continûment et uniformément sur tout l'échantillon. C'est possible uniquement parce qu'il existe un point critique.

État métastable

État métastable : il s'agit d'états d'équilibre locaux, et non pas globaux. Le potentiel y est minimal, mais il ne s'agit pas d'un minimum global. Une fluctuation assez forte peut donc sortir le système de cette position.

Transition de phase dite d'ancrage

A lieu lorsqu'un cristal passe d'une phase aperiodique a une phase periodique. Voir SFP numéro ?

Pas de retard à la fusion

Les matériaux ne présentent pas de retard à la fusion, car ils contiennent déjà des germes de phase liquide (cf BUP835, article sur la glace). Ces germes sont essentiellement présents à la surface. Voir le BUP précité pour le cas de la glace : jusqu'à -35° il y a présence d'une couche désordonnée à la surface de la glace.

Ébullition / évaporation

Voir Diu, Thermodynamique, appendice F.

Ébullition de l'eau : lorsque P_l (pression *du liquide*) devient supérieure à $P_{\text{sat}}(T)$ du liquide, ou plutôt (si on chauffe à P cst) lorsque $P_{\text{sat}}(T)$ atteint P . A lieu *en volume*. $P_{\text{sat}}(T)$ est définie par $\mu_l(T, P_{\text{sat}}(T)) = \mu_v(T, P_{\text{sat}}(T))$, et justement à l'équilibre (échange de molécules d'eau entre les phases) on a $\mu_l = \mu_v$. Par exemple, a lieu à 100°C sous 1 atm.

La formation des bulles est plus complexe. A priori il n'y en a pas : il faut un gradient de température, et pour que ce soit plus simple des points de nucléation (air adsorbé dans les parois, air dissout dans l'eau qui se dédissoit, ...). Les bulles se forment alors à T légèrement au dessus de 100°C , donc vers le fond du récipient.

Rq : pour un chauffage à V constant : pas de changement d'état car P vapeur augmente également et reste supérieur à P_{sat} .

Évaporation/condensation de l'eau : a lieu à toute température, et à *l'interface* entre l'eau et l'air, dès que P_v (pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air) est différent de $P_{\text{sat}}(T)$ *du liquide*.

En général (sauf climat très humide), P_v reste inférieur à $P_{\text{sat}}(T)$ et l'évaporation se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'eau, car les mouvements de convection évacuent la vapeur nouvellement formée loin de l'interface.

La condensation a lieu si $P_v > P_{\text{sat}}(T)$. Arrive sur une paroi froide par exemple, car si T diminue, $P_{\text{sat}}(T)$ aussi.

Interprétation microscopique : Pour les molécules s'échappant de l'eau vers l'air : mesuré par $P_{\text{sat}}(T)$. (Et ce sont les plus rapides qui partent : le liquide se refroidi.) Pour les molécules s'échappant de l'air vers l'eau : proportionnel au flux, donc à P_v . Échanges permanents, mais égaux lorsque $P_v = P_{\text{sat}}(T)$.

Applications : la transpiration (et aussi respiration), sensation de chaud en climat humide, ...

LP 16 – Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir.

Plan

Bien discuter pourquoi on applique la loi de Planck : rayonnement d'équilibre radiatif et thermique, ou corps noir à l'équilibre thermodynamique, ou corps noir à l'équilibre thermodynamique local. Faire attention aux flux qui sont intégrés sur 2π .

Bibliographie :

- Augier, Tec&Doc MP ancienne édition : indispensable.
- Gié Thermodynamique : bon complément.
- Hprepa Brébec PC thermodynamique : pour le pyromètre.
- Diu physique statistique : pour revoir la démonstration de la loi de Planck.
- Diu Thermodynamique.
- Portelli, La physique en applications : thermos.

Manips :

- Deux thermomètres et une QI.
- Éventuellement, QI réglable en intensité, fente et prisme : le bleu disparaît en premier lorsque l'on diminue la température du filament (voir MP11, émission, absorption de la lumière).

Niveau L2, pré-requis :

- Électromagnétisme.
- Thermodynamique .
- Conduction et convection.

Introduction

On a vu la convection et la conduction. Manip avec deux thermomètres, dont un éclairé par une QI.

La Terre est chauffée par le Soleil.

I - Bilan radiatif

1 Les différents flux

Définir un flux (qui sont intégrés sur 2π)

Corps opaques et transparents (OG pour le verre dans le Gié).

II - Rayonnement d'équilibre thermique et radiatif

1 Définitions des équilibres

Thermique : même température.

Radiatif : $\phi_R = 0$.

On pourrait supposer l'équilibre thermodynamique qui imposerait les deux (car pas de flux), mais c'est un peu fort (on n'a pas besoin des équilibres mécaniques, osmotiques, ...). Faire remarquer que ça implique beaucoup d'interactions matière-rayonnement (comme un GP), sans interactions "fortes" (de type raie atomique qui domine, fluorescence).

Ce rayonnement ne dépend que de T : $u_\nu(T)$ universelle.

Il concerne $d\phi/d\lambda = d\phi_p/d\lambda$.

2 La loi de Planck

Sans démonstration (mais avoir une idée). Donner ou pas le lien entre ϕ et u (habituellement avec le facteur $1/6$ simplifié, sauf dans le Gié).

3 Conséquences : lois de Wien et de Stefan.**III - Le corps noir**

1 Définition et réalisation pratique : brique dans l'IR, enceinte en général.

2 Corps noir à l'équilibre thermodynamique**3 Corps noir à l'équilibre thermodynamique local** (Gié)

ϕ_e est seulement dû à l'émission spontanée de la matière, et est donc indépendant des interactions avec l'extérieur : pour une portion du corps à l'équilibre thermodynamique local, ϕ_e est toujours le même. On peut donc se resservir de la loi démontrée dans le cas à l'équilibre.

4 Ordres de grandeurs

Flux surfacique solaire sur Terre : panneaux solaire.

Flux en W d'une ampoule, comparer à la fenêtre du visible.

IV - Applications

1 Le thermos avec le coefficient de réflexion (Portelli), on peut intégrer l'équation en Python, cf code LP18. Ou version plus simple : le refroidissement d'un litre d'eau.

2 Pyromètre à disparition de filament, [manip](#) si temps ? Cf Hprépa.

Conclusion et ouverture

Le meilleur exemple de corps noir que l'on observe est le fond diffus cosmologique. Mesure des températures en astrophysique. Mesure de la température dans l'échelle T90 à haute température (par la loi de Wien).

 **Remarques****Équilibre radiatif VS corps noir**

Pour le rayonnement sur un corps : ϕ_i flux incident, ϕ_a flux absorbé, ϕ_r flux réfléchi, ϕ_p flux partant, flux émis (par émission spontanée) ϕ_e .

On a $\phi_i = \phi_a + \phi_r$ et $\phi_p = \phi_e + \phi_r$.

En régime stationnaire, $\phi_i = \phi_p$, donc $\phi_a = \phi_e$.

Équilibre radiatif

Pour un corps à la température T , à l'équilibre thermodynamique avec le rayonnement, on a $\phi_i = \phi_p =$ loi de Planck. Mais ϕ_e (et ϕ_a) sont quelconques.

Corps noir

La définition de prépa : c'est un corps à la température T , à l'équilibre thermodynamique avec le rayonnement, qui ne réfléchit rien.

Donc c'est comme dans le paragraphe d'avant, mais cette fois comme $\phi_r = 0$ on a $\phi_i = \phi_p = \phi_a = \phi_e =$ loi de Planck.

Bien noter que seul $\phi_r = 0$ va être utile, pas la peine d'en dire plus.

L'intérêt pratique est de pouvoir appliquer ceci à un corps à peu près noir, à l'équilibre thermodynamique *local*, et pas à l'équilibre avec un environnement qui est ouvert. Le Soleil par exemple (qui n'est pas à l'équilibre puisqu'il émet plus qu'il ne reçoit), ou un corps à T . Dans un tel cas, on applique le résultat du corps noir qui dit que $\phi_e = \text{Planck}$ (et pas seulement ϕ_a et ϕ_i).

Résumé de la démarche :

On montre que pour un corps placé dans une enceinte à l'équilibre radiatif et thermique, le flux partant ϕ_p est donné par la loi de Planck. Mais ceci n'est pas très utile en pratique, car on rencontre rarement de telles conditions. On introduit alors la notion de corps noir, corps opaque pour lequel le flux réfléchi ϕ_r est nul. Le flux émis ϕ_e est alors égal au flux partant, donc *le flux émis est donné par la loi de Planck*. Ça c'est pour le corps noir dans l'enceinte à l'équilibre radiatif et thermique.

Maintenant si on sort le corps noir de l'enceinte, on voudrait encore utiliser le fait que le flux émis ϕ_e est donné par la loi de Planck. À quelle condition est-ce le cas ? Il faut se souvenir que le flux émis est dû à l'émission spontanée des atomes constituant le matériau, émission qui interagit au sein du matériau avant d'en sortir (et qui interagit nécessairement beaucoup car le matériau est opaque¹). Le flux émis est donc fixé uniquement par la répartition en énergie de ces atomes (qui agissent à la fois en tant qu'émetteurs et en tant que centres d'interaction rayonnement-matière). Cette répartition est donnée en gros par le facteur de Boltzmann dès que l'on est à l'équilibre thermique, même local. On arrive donc à ce que l'on voulait : on peut utiliser la loi de Planck pour le flux émis par un corps noir (c-à-d un corps opaque tel que $\phi_r = 0$) qui est à l'équilibre thermique local (c-à-d dont les couches superficielles ont une température suffisamment uniforme pour que les niveaux d'énergie des atomes suivent une distribution d'équilibre à T).

On peut enfin être plus précis à propos de "dont les couches superficielles ont une température suffisamment uniforme pour que les niveaux d'énergie des atomes suivent une distribution d'équilibre à T ". Ceci sera réalisé si l'échelle donnée par gradient de température est grande devant le libre parcours moyen entre deux collisions (car ce sont les collisions qui assurent la relaxation vers l'équilibre). La condition d'opacité impose par ailleurs une profondeur optique de ces couches supérieure à 1, c'est-à-dire un libre parcours moyen pour les photons petit devant la taille de ces couches. En bref, il faut pouvoir dégager une zone où T varie peu, dans laquelle il y a beaucoup de collisions matière-matière et matière-photon.

Conditions d'équilibre

Pour avoir l'équilibre thermodynamique matière-rayonnement, il faut :

- 1- Matériau à la température T ,
- 2- La lumière produite ou absorbée interagit de très nombreuses fois avant de quitter le corps (ce

1. Cette interaction est essentielle, car de la matière à l'équilibre thermique n'émet pas, sans ce "reprocessing", un rayonnement qui suit la loi de Planck. Cf par exemple le spectre du rayonnement de Bremsstrahlung thermique : des électrons suivant une distribution de Maxwell à T et étant déviés par une population d'ions (distribution de Maxwell à T également) produisent un rayonnement dont on peut calculer le spectre, et qui n'est pas du tout celui de Planck. Cf également un gaz d'atomes neutres à T : ils émettent un spectre de raies, certes élargies, mais pas un spectre de Planck. C'est donc la thermalisation du rayonnement par la matière qui amène le rayonnement vers l'équilibre thermique, et donc vers la loi de Planck. Ceci se voit très bien si l'on écrit l'équation du transfert radiatif (cf Ribicky&Lightmann) où l'on voit que pour des profondeurs optiques supérieures à 1 *dans un matériau à l'équilibre thermique* le spectre tend vers celui de Planck suite à la balance émission/absorption (corrigée de l'émission stimulée).

Une autre conséquence de ceci est que quel que soit le corps, les couches très superficielles, pour lesquelles le rayonnement n'interagit pas beaucoup avant de s'échapper, n'émettent pas un spectre de Planck. Mais dans les situations pratiques cette contribution est faible.

qui est habituellement résumé en : le matériau absorbe toute radiation). Ainsi, les photons sont thermalisés et atteignent la distribution de Planck. (voir Landau et Lifshitz, statistical physics).

On peut le voir en écrivant l'équation du transfert radiatif, et en utilisant la loi de Kirchoff (voir par ex. Rybicki et Lightman, Radiative processes in astrophysics).

Voir Aslangul pour les processus d'émission dans la matière condensée ?

Pourquoi pas un spectre de raies ?

- Un gaz parfait à T émet un spectre de raie.
- Pour une cavité de volume V , δk est en $1/V$ très très petit.
- Pour un métal ou le Soleil, les processus d'émission émettent quasi-continûment ou continûment (bandes d'énergies continues dans un métal, diffusion Compton photons-électrons qui répartissent l'énergie continûment, élargissement des raies par effet Doppler ou par couplage avec l'environnement, surtout pour des molécules, ...).

Pourquoi un potentiel chimique nul ?

Le nombre de photons n'est pas conservé pour un système isolé (attention, c'est très différent d'une situation d'échange de particules entre un réservoir et le système, où le nombre total reste constant, ici ce n'est pas pareil car le système est isolé). Donc, en canonique, N ne peut pas apparaître dans les variables caractéristiques. Donc on a $F(T, V)$. Écrire μ n'a donc en fait pas de sens.

Pour réutiliser des résultats d'autres fluides, on dit quand même que $\mu = 0$ puisque c'est formellement le cas : si on a $F(T, V, N)$, alors $\mu = \partial F / \partial N = 0$. (Voir Diu physique statistique.)

De plus, l'existence de processus, à l'équilibre thermodynamique, de type $\gamma + \gamma \rightarrow \gamma + \gamma + \gamma$ indique que $2\mu = 3\mu$, donc $\mu = 0$.

Le CMB

$T \propto a^{-1}$. La densité volumique d'énergie est bien celle d'un CN à 3 K, et elle est $\propto T^3 \propto a^{-3}$ (où a est le facteur d'échelle).

LP 17 – Phénomènes de transports

Plan

Bibliographie :

- Handbook
- **Cap Prépa** : diffusion, exercice effet de cave et création d'entropie.
- **Portelli** : exercice vase Dewar, voir aussi Carpentier.
- Sanz pour confirmer

Manips :

- Conductiscopes.
- Montrer un vase Dewar.

Introduction

Qu'est-ce qu'un phénomène de transport ?

Une quantité conservée (nombre de particules, impulsion, moment cinétique, énergie, charge, flux magnétique, ...) est transportée dans le système. Par : diffusion (via des mouvements microscopiques), convection/advection (via des mouvements macroscopiques du fluide), rayonnement (pour l'énergie), ...

But : aborder les phénomènes de transport à travers un exemple particulier : le transfert thermique par diffusion (on n'a pas le temps de tout traiter, et il faut donc choisir).

I - Diffusion thermique

1 Équation de conservation

Définir l'équilibre thermodynamique local.

Démo de la conservation de l'énergie. Pb : nécessité d'une relation liant j à T .

2 Loi de Fourier puis équation de la chaleur

Phénoménologique, ordre 1, linéaire, motivée par les conductiscopes, ...

OG partout (béton, eau, on se brûle avec des cuillères en bois et en alu, $L \propto \sqrt{t}$, ...).

3 Analogie avec d'autres phénomènes de transports

4 Lien avec la création d'entropie

Exercice du Cap Prépa dans le cas simple du régime stationnaire. Prouve que $\lambda > 0$.

5 Application : effet de cave (ou pas selon temps)

Exercice Cap Prépa. Et les canalisations ne gèlent pas, le vin se conserve, etc...

II - Application au vase Dewar

Portelli.

1 **Expression de λ dans un gaz parfait**, préliminaire nécessaire.

2 **Résistance thermique**, insister sur la généralité de la notion.

3 Le vase

Faire l'AN avec λ comme en 1. Mais en fait le libre parcours moyen est donné par la distance inter-paroi : il est intéressant de baisser P , d'où une nouvelle expression.

Conclusion et ouverture

Parler de la convection : $\partial T/\partial t$ devient DT/Dt . Du rayonnement.

Remarques

Attention, la démonstration classique de l'équation de la chaleur n'est valable que pour un fluide incompressible, car on écrit $dU = C_v dT$, ce qui est valable à volume constant seulement. C'est donc bon pour un liquide ou un solide. Pour un gaz, c'est bon si l'écoulement est incompressible (sinon il faut réfléchir, cf un sujet d'épreuve A ou C...).

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

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa et Sanz PC.
- Carpentier, la physique en application : exercices VMC, vase Dewar.
- Portelli.
- Tec&Doc ancienne édition, MP : rappels sur le corps noir.
- Guyon, Hulin, Petit : convection.

Manips :

- Deux thermomètres et une QI.
- Conductiscope pour la conduction dans les métaux.
- Convection dans le tube avec eau et sciure.

Niveau L2, pré-requis : thermodynamique, notion de corps noir, hydrodynamique.

Introduction

Importance des transferts thermiques pour l'isolation des bâtiments, des bouteilles thermos (pour le café ou l'azote liquide, les vases Dewar, ...), le réchauffement planétaire, les serres, ...

Trois modes de transfert que l'on va détailler : exemple de la cheminée.

But : se donner *des outils et des démarches* pour faire des modèles simples permettant d'estimer des temps de refroidissement, des températures, des flux thermiques. Insister sur ce point : on ne va pas détailler la physique de chaque mode de transport d'énergie (il faudrait une leçon pour chaque), mais présenter des outils, des lois, et la façon de s'en servir.

I - Rayonnement thermique

Dans la continuité de la leçon sur le rayonnement d'équilibre thermique.

1 Lois de Wien et de Stefan

Dire qu'on assimile le corps à un corps noir (et relire le Tec&Doc MP ancienne édition à ce sujet). OG pour un homme, une habitation (détecteur de fuites thermiques).

2 Exemple du thermos, éventuellement code Python pour la solution. Carpentier ou Portelli. Donner des temps de refroidissement.

II - Conduction thermique

1 Loi de Fourier

Manip : conductiscope. OG de λ .

2 Équation de la chaleur

OG de D . Analyse dimensionnelle : estimer $\tau = L^2/D$ pour le chauffage d'une casserole d'eau.

3 Cas stationnaire

Résistance thermique. Parler de béton et d'isolant et de vitres, donner un OG pour une maison (cf Carpentier, exo VMC double flux qui donne des chiffres).

Tout ceci n'est valable que si les fluides sont immobiles (on l'a bien vu pour la casserole d'eau).

III - Convection

1 Description du phénomène

Distinguer naturelle (quand on chauffe de l'eau dans la casserole, et dans la manip) et forcée (la VMC par exemple, et l'agitation des béchers en chimie).

Montrer les équations (pour la naturelle), et c'est tout.

Manip : convection dans le tube avec eau et sciure, ou pas si temps.

2 Loi de Newton

Modèle avec de la diffusion dans la couche limite immobile (dont l'épaisseur est en L/\sqrt{Re}). Mais en vrai il peut y avoir des mouvements ascendants (convection naturelle), d'où la loi phénoménologique. Voir Sanz pour des OG ?

3 Exemple du double vitrage (exo. Cap Prépa ou Carpentier, plutôt Cap Prépa). Attention, dire directement qu'entre les vitres on prend un échange convectif en $h_i \Delta T$.

4 Exemple de la VMC (Carpentier). D'abord calcul avec le simple flux : nécessite un chauffage significatif par rapport à celui calculé en II.3. Puis double flux si temps (sûrement pas donc).

On peut conclure en regroupant les différents exemples (sauf le vase Dewar) en un grand bilan thermique pour une maison.

Conclusion et ouverture

Bilan thermique pour une maison, mais aussi par exemple pour la Terre (avec aussi l'effet de serre).

Remarques

Refroidissement d'un thermos par rayonnement

L'équation différentielle obtenue n'est pas solvable analytiquement. Supposons que $T = 100^\circ\text{C}$ initialement, et qu'à l'extérieur $T = 10^\circ\text{C}$, avec un thermos de rayon 5 cm et de hauteur 20 cm, avec 1 L d'eau.

On peut réaliser une approximation linéaire ($T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} + \epsilon$), et on trouve alors $T = 50^\circ$ au bout de 2h30. On peut résoudre l'équation différentielle numériquement, et on trouve cette même température au bout de 1h50.

Une analyse dimensionnelle simple montre que le temps pertinent est $\tau = 1/(S\sigma T^3/c_p)$. Avec $T = 100^\circ\text{C}$ on a $\tau = 5\text{h}$, et avec $T = 10^\circ\text{C}$ on a $\tau = 11\text{h}30$. En faisant ceci on loupe des facteurs de l'ordre de 3 ou 4 qui apparaissent lors de l'intégration.

Le code Python pour intégrer l'équation de façon exacte :

```
from scipy import *
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib.pyplot as plt

def deriv (y,x):
    return -1.e-12 * (y**4 - 283.**4)

x0 = 0
xmax = 3600*20
npoints = 30000
x = linspace(x0,xmax,npoints)
y0 = 373.
```

```

solution = odeint(deriv,y0,x)
y=solution[:,0]

plt.plot(x,y)
plt.grid()
plt.show()

```

Convection naturelle

Exemple de la convection de Rayleigh-Benard : fluide entre deux plaques, une chaude en bas et une froide en haut. Il y a un seuil d'instabilité car il faut que la poussée d'Archimède soit supérieure à la force de viscosité (qui s'oppose au mouvement). Le critère porte alors sur le nombre de Rayleigh. On fait l'approximation de Boussinesq (ρ varie seulement dans le terme de poussée d'Archimède). Voir par exemple l'épreuve A de ...

Exemple de la convection dans l'atmosphère : on peut trouver un seuil pour le gradient de température au delà duquel la convection s'amorce. Cf exo Cap Prépa PC, chap. 7.

Ainsi, l'atmosphère devient instable si le gradient dépasse le gradient adiabatique, qui est de 10 degrés par kilomètre en atmosphère sèche (6.5 degrés environ en atmosphère humide). Ce gradient seuil est obtenu en supposant qu'une parcelle de fluide change d'altitude de façon adiabatique.

Conservation de l'étendue, 2nd principe, transfert radiatif

Cf dessin sur feuille de papier dans le bfr de thermodynamique.

Par exemple prenons un corps de surface S_1 , à la température T_1 , et un autre corps de surface S_2 à la température T_2 . Supposons qu'entre les deux on place une loupe. Les choses sont telles que les surfaces S_1 et S_2 sont images l'une de l'autre par la loupe. Disons que le grandissement est $\gamma = S_2/S_1 = 1/1000$, donc la lumière est "concentrée sur S_2 ". Supposons que au départ, $T_1 > T_2$. Et bien le second principe appliqué au système 1+2 dit qu'à l'équilibre, $T_1 = T_2$. On ne peut jamais avoir $T_1 < T_2$. Il y a certes un flux d'énergie qui va de 1 vers 2, mais aussi un flux qui va de 2 vers 1, et le flux net d'énergie est toujours du corps le plus chaud vers le plus froid, quel que soit le rapport S_1/S_2 . Dans ce cadre, on ne peut effectivement pas porter le corps 2 à une température supérieure de celle de 1 en utilisant uniquement le rayonnement de 1.

C'est très contre-intuitif car on a envie de raisonner sur les flux d'énergie, et le flux sur la surface 2 a l'air trivialement supérieur à celui émis par la surface 1...

C'est lié à la conservation de l'étendue optique, qui en fait se démontre aussi en partant du 2nd principe !

Références : <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node137.html> (et le cours associé), la page Wikipédia sur l'étendue optique (en anglais), <http://what-if-xkcd.com/145/>, Bruhat optique p. 17-18.

MP 5 – Mesure de température

Plan

Bibliographie :

- Asch, Capteurs.
- Duffait Capes : capteurs de température.
- Quaranta thermodynamique.
- Taillet, Dictionnaire de physique.
- BFR, et Sanz PC ou PCSI : mesure de température et gaz parfait.
- Duffait, Électronique : très bien fait pour les CTN, présente aussi les diodes et thermo-couples.

Introduction

Motivation : mesurer des températures est important, mais pas facile.
Thermomètre : définition (Taillet).

I - Capteur primaire de température

Thermomètre à gaz

On vérifie la loi $P \propto T$.

L'ordonnée à l'origine est un offset du manomètre (il ne s'explique pas par Van der Waals, et on voit qu'à pression ambiante le manomètre indique trop bas).

Attention : on vérifie la loi avec un capteur de température secondaire, avec lequel on mesure la température du bain. C'est aussi ce qui s'est fait historiquement (mesure avec les échelles centésimales, i.e., des thermomètres à alcool par exemple), puis on a dit : la température absolue est définie par la loi du gaz parfait.

Rq : Une échelle primaire ne nécessite pas d'étalonnage à partir de points fixes : on utilise la définition de la température thermodynamique. On a directement accès à la température en mesurant des grandeurs (pression, célérité) qui sont reliées à T via une loi thermodynamique.

II - Capteur secondaire de température

Résistance de platine

On fait comme dans l'échelle T90 : étalonnage à partir de points de références. Ici : eau glacé et bouillante, éventuellement gallium. Montage 4 fils avec le voltmètre de précision. Laisser thermaliser, puis connecter le voltmètre et mesurer rapidement (la mesure au voltmètre chauffe la sonde).

Fit en $R(T) = R_0(1 + bT)$, et comparaison avec la notice. Il y a normalement un terme en R_0cT^2 , qu'on ne peut pas trop discuter car on manque de points...

Si on prend un point dans l'azote, il faut un terme en T^3 dans le modèle, donc on ne prend pas de point dans l'azote...

Sensibilité : $s = (1/x)dx/dT$.

Remarques : Le thermomètre primaire n'est pas pratique. On utilise une échelle secondaire. Une échelle secondaire utilise la variation d'une grandeur physique (résistance du platine par exemple) en fonction de T . Il faut construire une courbe d'étalonnage à partir de la mesure

de la grandeur en question à des températures connues : les points fixes (par exemple mélange eau-glace, eau bouillante, azote liquide en ébullition, étain en fusion, ..., ces températures étant déterminées expérimentalement puis tabulées avec un capteur primaire). Ce sont ces échelles qui sont utilisées en pratique.

Sonde de platine : c'est avec elle que l'on mesure les températures selon la norme IT90 entre 13.8 K et 1234 K.

III - Caractérisation d'autres capteurs : thermocouple et thermistance

Expliquer les principes.

1 Loi $f(T)$

Plongés dans le bain thermique ou dans un Dewar ou bécher et on ajoute de l'eau bouillante/froide pour varier T et aller plus vite.

Attention : on mesure T avec la sonde de platine (pour la démarche).

Prendre une CTN avec $R \ll 50 \text{ k}\Omega$ ($50 \text{ k}\Omega$ est la résistance de l'eau l'environnant, qui doit pouvoir être sans influence).

Sensibilité.

2 Temps de réponse

Passer de l'eau froide à l'eau bouillante.

Pour le thermocouple, sortie numérique à l'arrière de l'ampèremètre vers l'ordinateur.

Mentionner que le temps de réponse dépend du conditionnement.

IV - Hautes températures : loi d'émission de Planck

À faire ou à mentionner en ouverture.

Utiliser le pyromètre en mode deux couleurs, mesurer la température de la lampe halogène 50 W, ainsi que la puissance électrique. Tracer $\log T$ en fonction de $\log P_{\text{elec}}$, et montrer que la loi de Stephan est vérifiée.

Remarques

Effets thermoélectrique

Voir Quaranta, thermodynamique (l'édition la plus grosse) pour une approche efficace. Voir Diu, thermodynamique, pour être plus complet. Voir Asch pour les réalisations pratiques (mais pas pour la théorie, il contredit Quaranta et Diu sur les définitions). Par ailleurs, Taillet, dans son dictionnaire, donne une mauvaise définition de l'effet Seebeck, et Duffait (électronique) cite Asch et reproduit les mêmes erreurs...

On sait qu'on a les lois de Fourier et d'Ohm, qui décrivent respectivement la conduction thermique (en l'absence de conduction électrique) et la conduction électrique (en l'absence de conduction thermique) :

$$\mathbf{j}_q = -\lambda \nabla T \quad \text{et} \quad \mathbf{j} = -\sigma \nabla V. \quad (4.4)$$

Ces deux phénomènes sont en fait liés, car la charge et la chaleur sont tous deux transportés par les mêmes particules : pour un conducteur ou semi conducteur, il s'agit essentiellement des électrons de conduction. Par exemple, la chaleur est transportée par diffusion de ces particules (terme loi de Fourier), mais aussi par advection (les électrons de conduction dans un champ

électrique). On a en fait des équations couplées :

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_q &= L_{11} \nabla(1/T) - (L_{12}/T) \nabla V \\ \mathbf{j} &= L_{21} \nabla(1/T) - (L_{22}/T) \nabla V \end{aligned} \quad (4.5)$$

(Il faudrait en fait prendre le potentiel chimique à la place de V , et peut-être que c'est en fait $\nabla(\mu/T)$, peu importe si on veut juste donner l'idée générale...) Onsager a montré, par des arguments de réversibilité des équations microscopiques, que $L_{12} = L_{21}$, et plus généralement que la matrice des coefficients de transport est symétrique.

Effet Seebeck

On voit que si $\mathbf{j} = 0$, on a $\nabla V = -\epsilon \nabla T$ avec $\epsilon = L_{21}/(TL_{22})$. Donc à courant nul, un gradient de température fait apparaître un gradient de potentiel. Il faut ensuite pouvoir mesurer cette ddp. Le problème est que la mesure est faite par un voltmètre, pour lequel les bornes + et - sont à la même température. Or $\int dT$ entre deux points de même température est nulle. C'est pourquoi on utilise des métaux différents : on a un métal entre les points P et 1, un autre métal entre les points 1 et 2, et un métal identique au premier entre les points 2 et Q . La mesure se fait entre P et Q , qui sont à la même température T_a . Le point 1 est à T_1 (un mélange eau glace par exemple), et le point 2 à T_2 (que l'on veut connaître). On a alors $V_P - V_Q = \int_{T_a}^{T_1} (-\epsilon dT) + \int_{T_1}^{T_2} (-\epsilon' dT) + \int_{T_2}^{T_a} (-\epsilon dT) = \int_{T_1}^{T_2} (\epsilon - \epsilon') dT$. On réalise ainsi un thermocouple.

Remarque : dans un thermomètre à thermocouple commercial, on n'utilise pas de mélange eau-glace... Il n'y a en fait qu'une seule soudure, avec un métal entre P et 1, et un autre métal entre 1 et Q , et on mesure alors $V_P - V_Q = \dots = l(\epsilon' - \epsilon)(T_1 - T_a)$. Il faut donc connaître T_a . Ceci est réalisé à l'aide d'une thermistance (!) insérée dans un pont de Maxwell, la tension du pont étant alors proportionnelle à la température T_a , et cette tension est utilisée pour corriger la mesure.

Enfin, si le courant n'est pas nul, l'effet Seebeck se couple à d'autres effets.

Effet Pelletier

À température uniforme, donc $\nabla T = 0$, on obtient $\mathbf{j}_q = \epsilon T \mathbf{j}$. Donc à un courant électrique s'associe un flux de chaleur, et vice versa. Pour pouvoir mener à un échauffement, il faut que ϵ soit non homogène (car sinon, comme par conservation de la charge on a $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$, on a la même chose pour \mathbf{j}_q). C'est pourquoi on fait passer ce courant dans une jonction entre deux métaux ou semi-conducteurs. On reçoit alors une puissance $\mathbf{j} T (\epsilon - \epsilon')$. Remarquons qu'elle change de signe si on inverse \mathbf{j} . On peut donc chauffer ou refroidir la jonction en fonction du signe du courant.

Effet Thomson

Un conducteur homogène (donc pas de jonction) avec un gradient de température et parcouru par un courant électrique reçoit alors de la puissance thermique : $P \propto \mathbf{j} dT/dx$.

MP 6 – Transitions de phase

Plan

Bibliographie :

- Quaranta thermodynamique.
- Dictionnaire de physique, Taillet.
- Diu thermodynamique : définitions.
- JFLM2 : recalescence du fer.

Introduction

Définir une phase : région de l'espace où les paramètres intensifs varient de façon continue.

Définir une transition de phase : quand les phases en présence changent.

Définir l'ordre d'une transition : selon Ehrenfest, selon Landau, ou selon les deux (voir l'appendice du Diu thermodynamique et les remarques).

Importance en chimie (extraction par fluides supercritiques), pour les machines thermiques, ...

I - Transition liquide-gaz et liquide-solide

C'est une classe de transition de première importance.

1 Transition liquide-gaz : SF6 (notice et Quaranta).

Remonter à la chaleur latente avec la formule de Clapeyron.

2 Transition liquide-solide : chaleur latente de fusion de l'eau (Quaranta).

Prendre de la glace fondante (donc à 0 degrés), la sécher le plus possible. Suivre la température en fonction du temps avec un thermocouple sous Latis Pro.

Ne pas oublier de déterminer la masse en eau du calorimètre.

Enregistrer les variations de T avant et après la mesure pour avoir une bonne idée des fuites thermiques.

II - Phénomènes à la transition

1 Surfusion de l'étain

Acquisition de T avec le thermocouple relié à Latis Pro. Changer de méthode d'acquisition si ça ne donne pas la bonne température.

2 Point critique et opalescence

Se mettre 2 degrés au dessus de T_c , et mettre un bécher de glace sur la cellule.

Phénomène d'opalescence : pour $T < T_c$, on a deux phases et donc des gouttes de l'une dans l'autre ; pour $T > T_c$ on n'a qu'une seule phase : à $T = T_c$, on a toutes tailles de gouttes. On passe donc d'un régime de diffusion de Rayleigh (petites gouttes, plutôt rouge) à un régime de diffusion de Mie (grosses gouttes, noir).

Voir Taillet, et surtout Diu thermodynamique.

III - D'autres exemples de transition

1 Transition para/ferro

Utiliser le dispositif avec le thermocouple dans la partie en fer. Sans champ B , cette

transition est du second ordre (M est continu), mais avec un champ B_0 fixé il n'y a en fait pas vraiment de transition (M reste continu).

2 Recalescence du fer

JFLM2. Transition du premier ordre.

Remarques

La transition liquide-gaz est du premier ordre en dessous du point critique, du second ordre au point critique, et il n'y a plus de transition au delà du point critique.

A propos de la chaleur latente de vaporisation de l'azote : pas acceptable avec le cuivre, car C_p varie trop avec T ; une alternative raisonnable est avec une résistance chauffante, mais ça n'a pas l'air franchement reproductible...

MP 34 – Phénomènes de transport

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Taillet Dictionnaire de la physique.
- Quaranta.
- Calecki, exercices de thermodynamique : théorie pour la diffusion du glycérol.
- Guyon, Hulin, Petit, Hydrodynamique physique.
- Cap Prépa PC.

I - Rayonnement

Deux thermomètres dont un éclairé pour illustration.

Ampoule halogène et loi de Stefan (voir MP11, émission, absorption de la lumière) (ce n'est peut-être pas un très bon choix, les autres manips sont à privilégier).

II - Convection

Qualitatif, avec le tube en U bouclé et de la sciure. Chauffer au chalumeau.

III - Diffusion thermique et de particules

- 1 **Diffusion thermique** : barre de cuivre en régime sinusoïdal forcé. Voir MP17, métaux.
- 2 **Diffusion du glycérol dans l'eau** (voir MP précédent), ou alors chute des billes dans le glycérol (un peu moins pertinent, mais très simple).

IV - Conduction électrique

Conduction électrique : mesure de σ_{cuivre} (en fonction de T , et tracer Wiedmann-Franz, car en fait seul σ dépend de T et pas trop D).

Conclusion et ouverture

Phénomènes non abordés, importance pour plein de choses (isolation thermique, conduction dans les fils (épaisseur de peau), ...).

Chapitre 5

Électromagnétisme

LP 19 – Conversion de puissance électromécanique

Plan

Bibliographie

- Cap Prépa PSI.
- Quaranta IV, Électricité et applications (très bien).
- Brébec H-Prépa Électronique II.
- Précis Bréal Électronique PSI.
- BUP 846 : utilisation des moteurs.

Manips :

- Rails de Laplace.
- Sortir la machine à courant continu démontée.
- Les 3 bobines pour produire le champ tournant avec au milieu : boussole (moteur synchrone) ou cage d'écureuil (montage asynchrone).

Niveau L2, pré-requis :

- Induction

I - Rails de Laplace

Faire un bilan de puissance et montrer que $P_{\text{méca}} + P_{\text{elec}} = 0$.

Être précis sur les conventions algébriques.

Faire la **manip**. Envoyer un peu plus de 3 A, frotter les rails au papier de verre, on peut l'aider à partir en secouant un peu. Pour savoir où est le nord de l'aimant, prendre une boussole. Se rappeler que le champ magnétique terrestre pointe vers le nord géographique.

II - Machine à courant continu

Être bref : c'est un rail de Laplace. Juste donner le principe, les balais, et $e = k\phi_0\omega$, $\Gamma = k\phi_0i$. Fonctionne en générateur ou en moteur. Utiliser la présentation du Quaranta, et l'exo corrigé du Cap Prépa.

III - Machines à champ tournant

- Synchrones : principe ; lien flux/ e et Γ ; équation électrique et mécanique ; discussion de la stabilité des points de fonctionnement. Moteur ou générateur.
Utiliser l'exercice corrigé du Cap Prépa.
- Asynchrone : idem synchrone, selon le temps.

Conclusion et ouverture

Parler de l'utilisation, de ce qu'on n'a pas abordé (Quaranta).

LP 20 – Induction électromagnétique

Jury :

Consacrer un temps conséquent aux applications. Dont certaines avec des courants volumiques. Se tenir à ses conventions de signe. Pas nécessaire de traiter en détail induction de Lorentz et de Neumann. Préciser la notion de force électromotrice. Mentionner moteurs et transformateurs. Induction de Lorentz, lien avec la relativité restreinte ?

Plan

Bibliographie :

- **Cap Prépa** et **Sanz** PC ancien programme : la leçon.
- **Garing** : chauffage par induction.
- **Précis Bréal** PSI électrotechnique : le transformateur.
- **BFR électromagnétisme 3** : les subtilités Lorentz/Neumann en même temps.

Manips :

- Aimant dans une bobine.
- Utilisation de la pince ampèremétrique.
- Champ induit par une bobine dans une autre (sans rien, puis avec un matériau canalisateur).

Niveau L2, pré-requis :

- Équations de Maxwell.
- Électromagnétisme, ARQS magnétique.
- Loi d'Ohm locale.

Introduction

Manip d'introduction illustrant la loi de Faraday : on a un courant lorsque le flux de B varie à travers un conducteur, que ce soit l'un ou l'autre qui bouge. Historique : loi de Faraday venue avant les équations de Maxwell.

I - Induction de Neumann

Pour toute la leçon : ARQS magnétique, on néglige le courant de déplacement.

1 Champ électromoteur et force électromotrice de Neumann, loi de Faraday

Champ électromoteur : $E_m = -\partial_t A$ (la partie ∇V est à circulation nulle), et $e = \int E_m dl$. D'après l'équation de Maxwell-Faraday, si le flux de B à travers le circuit varie, alors on a $e \neq 0$. On montre la loi de Faraday.

Si le circuit est fermé : accélère les charges, induit un courant.

2 Schéma électrique équivalent

On traite le cas de la spire.

3 Loi de modération de Lenz

4 Courants de Foucault et chauffage

Exemple de Garing.

Jusqu'ici assez général. On va maintenant préciser qui produit les champs B et à travers quoi.

II - Inductance mutuelle et auto-induction

Application pratique énorme : les transformateurs et les bobines électriques, qui utilisent respectivement l'inductance mutuelle et propre.

- 1 Inductance mutuelle
- 2 Inductance propre
- 3 Application : le transformateur

III - Vers l'induction de Lorentz

Voir BFR.

1 Champ électromoteur et force électromotrice de Lorentz, loi de Faraday

On adopte le point de vu où on applique la loi d'Ohm locale dans le référentiel du conducteur, avec donc un changement de référentiel pour le champ E (qui est valable dans la limite non-relativiste ARQS magnétique).

Le champ électromoteur (qui peut être à circulation non nulle) est alors $E_m = v \wedge B$.

(Rq : on peut aussi interpréter les choses en disant que $v \wedge B$ est la force exercée sur les charges.)

À partir de là, en manipulant les intégrales, on montre la loi de Faraday pour Lorentz : $e = -d\Phi_c/dt$, où intervient le flux coupé. Rq : si indéformable, $d\Phi_c/dt = d\Phi/dt$.

2 Cas général

Les deux fem s'ajoutent.

La relation générale, toujours (vraiment toujours) valable est $e = \oint (E + v_{\text{conducteur}} \wedge B) \cdot dl$.

La relation $e = -d\Phi/dt$ est correcte s'il n'y a pas de contacts glissants (voir les exemples de BFR : roue de Barlow, bobine avec un curseur pour faire varier l'inductance, ou encore moteur homopolaire de Faraday (chercher sur internet), qui sont des cas où seul le calcul avec la fem fonctionne).

Conclusion et ouverture

Parler impérativement des moteurs.

Remarques

On peut parler des capteurs inductifs dans la chaussée (cf Carpentier).

Dans les nouveaux programmes 2014 (tout comme dans les programmes de 1984, cf BFR), l'induction est vue avant les équations de Maxwell. L'approche est donc différente de celle présentée ici ou dans les anciens programmes. Il ne faut donc pas préciser CPGE, mais bien L2.

LP 27 – Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

Plan

Bibliographie :

- **Cap Prépa** PC : presque tout.
- Jackson : compléments.
- **BFR** Électromagnétisme 4 : tout mais c'est long.
- **Brebec** Hprépa Ondes et Sanz PC : compléments et loi de Cauchy.
- Garing.

Manips :

- Décomposition de la lumière par un prisme.

Niveau L2, pré-requis :

- Vecteur polarisation
- Indice optique et lois de Snell-Descartes
- Ondes électromagnétiques dans le vide, dispersion et absorption des ondes.

Introduction

On a vu que dans un diélectrique, il y a une polarisation du milieu sous l'action de \mathbf{E} . On s'attend donc à ce que les ondes pouvant s'y propager soient différentes de celles dans le vide.

Et en effet : **manip** prisme, les différents λ ne se comportent pas pareil. On va comprendre l'origine de l'indice optique (et même le sens de variation de celui-ci avec λ).

I - Milieux diélectriques

1 Rappels (transparent) : vecteur polarisation = densité volumique de moments dipolaires, $\mathbf{P}(M, t)$.

Les charges liées donnent lieu à une densité de charge et de courant donnés par $\mathbf{j}_p = \partial_t \mathbf{P}$ et $\rho_p = -\nabla \cdot \mathbf{P}$. (Ce ne sont pas nécessairement des charges et courants "réels", cf le modèle avec des + et - organisés pour faire des divergences...)

2 Lien $P - E$: susceptibilité : $P = \epsilon_0 \chi(\omega) E$.

Milieu LHI, passer en Fourier : on considère $E(M, t) = E_\omega \exp(i(\omega t - kr))$. On a alors la relation $P_\omega = \epsilon_0 \chi(\omega) E_\omega$, et donc aussi $P = \epsilon_0 \chi(\omega) E$. Ne pas oublier qu'en général, dans le domaine temporel, c'est une convolution : $P = \epsilon_0 (\chi * E)$ (qui d'ailleurs est spatiale et temporelle, mais on néglige toujours le spatial, voir Detwiller, Qu'est-ce que l'optique géométrique).

3 Équation de propagation

Arriver à l'équation de type d'Alembert, introduire $\epsilon_r = 1 + \chi$ et n selon $n^2 = 1 + \chi$.

Rq : on n'introduit pas le vecteur induction $D = \epsilon E$.

4 Structure des ondes planes progressives harmoniques

Même structure de trièdre k, B, E que dans le vide. Lien entre n' et la dispersion, entre n'' et l'absorption.

Il nous manque maintenant une relation constitutive donnant χ (et donc n) en fonction des champs. Plusieurs sont possibles, on va se concentrer sur une seule.

II - Relations constitutives

1 Différents types de polarisation (Cap Prépa)

On applique un champ E , et les charges de la matière répondent, et créent un champ E_p . Elles ressentent donc un champ $E_l = E + E_p$.

Polarisation électronique : déformation des nuages électroniques des atomes. On a $P = \alpha_e \epsilon_0 E_l$. Dans l'UV pour l'eau.

Polarisation d'orientation : les molécules possèdent des moments dipolaires permanents, qui subissent un couple $p \wedge E_l$ et s'orientent selon E_l . Temps de réponse lent, non-opérant dans l'optique.

Polarisation ionique : dans un cristal, les ions se déplacent sous l'effet de E_l , ce qui forme un moment dipolaire $P = \alpha_i \epsilon_0 E_l$. Ce phénomène est à l'origine de l'effet piézoélectrique : le déplacement des ions sous l'action de E peut déformer le cristal, et vice-versa, une action mécanique sur le cristal le déforme et crée une polarisation. Dans un liquide ou un gaz, la polarisation ionique correspond aux vibrations des molécules, donc typiquement dans l'IR (pour l'eau par exemple).

On a aussi des milieux ferroélectriques (le titanate de baryum par exemple).

Donner des OG. Montrer le graphe pour l'eau (Sanz ou BFR).

2 Modèle de l'électron élastiquement lié

Dérouler les hypothèses sur transparent, et tracer directement l'allure des courbes pour $\chi'(\omega)$ et $\chi''(\omega)$.

Interprétation physique du modèle, OG des paramètres.

On a vu un exemple de relation constitutive.

De façon plus générale, le fait d'avoir $n(\omega) = n'(\omega) + n''(\omega)$ va impliquer de la dispersion et de l'absorption.

La démarche générale est donc de se donner un modèle pour $n(\omega)$, et de s'en servir pour expliquer dispersion et absorption dans différents cas. Insister là dessus pour chaque sous-partie du III.

III - Dispersion et absorption

1 Dispersion et loi de Cauchy, Sanz PC

C'est juste un DL de $n'(\omega)$ à l'ordre 2 pour $\omega \ll \omega_0$. Aller vite et être grossier. Justifier l'approximation $\omega \ll \omega_0$ en terme de λ .

OG.

2 Absorption et loi de Beer-Lambert

3 Loi de Snell-Descartes, Cap Prépa (à voir pour ne pas y passer trop de temps).

Remarques

Le titre de la leçon commence par "ondes". Le cœur de l'exposé est le I.4 et le III.

Modèle de l'électron élastiquement lié

Le terme de rappel élastique est la force électrostatique ion-électron dans le cas où le nuage électronique contient toujours le noyau. Le terme de frottement rend compte de la perte d'énergie par rayonnement, qui normalement est $m\tau da/dt$ (Abraham-Lorentz), mais qui se réécrit comme mv/τ' dans la limite $\omega \ll 1/\tau = 10^{23} \text{ s}^{-1}$.

La vraie description quantique modélise la transition entre deux niveaux. Si la population du fondamental est très supérieure à celle de l'état excité, alors les équations d'évolution des quantités moyennes sont celles de l'électron élastiquement lié.

Réflexions

Réflexion totale sur un diélectrique : le coefficient de réflexion est de module 1, et introduit un déphasage compris entre 0 et π selon l'angle d'incidence (cf par exemple l'épreuve A 2003, ou probablement le livre de Hecht, Optique).

Relations de Kramers-Kronig

Elles lient de façon intégrale les parties réelles et imaginaires de χ . Elles se démontrent à partir de la causalité.

Elles montrent qu'un système sans absorption ($\chi'' = 0$) ne présente aucune dispersion, ou par contraposée qu'un système dispersif présente de l'absorption.

Attention, la réciproque n'est pas vraie (cf le câble coaxial dans la condition de Heaviside) : on peut n'avoir aucune dispersion (n' indépendant de ω) et absorber (n'' non nul), ceci parce que les relations ne portent pas directement sur n mais sur $1 + \chi = n^2$.

La couleur des matériaux

Voir : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Couleur.xml>, ainsi que le corrigé de la leçon de 2015.

De façon générale, il faut distinguer la couleur d'un objet vu par transparence (la couleur est alors celle qui n'est pas absorbée), la couleur d'une lumière réfléchie selon les lois de Descartes à la surface d'un objet (qui en général est de la couleur de la source, sauf sur les métaux où la lumière interagit tout de même un peu avec le matériau), et la couleur d'un objet renvoyant de la lumière par diffusion (la lumière interagit alors beaucoup avec les atomes / les réseaux / etc, et est significativement absorbée, ce qui en change la composition spectrale).

Piezoélectricité

Voir plan de la leçon.

Voir aussi BUP 990 pour un article introductif, avec des applications.

On peut retenir que la description se fait avec le tenseur des contraintes T , le tenseur de déformation S , le champ électrique \vec{E} , et l'induction électrique \vec{D} , le tout couplé par deux relations linéaires du type $T_{ij} = c_{ijkl}S_{kj} - e_{kij}E_k \dots$

LP 28 – Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa PC : tout le plan.
- Ashcroft : détails sur le modèle de Drude.
- Garing, ondes électromagnétiques dans le vide et les milieux conducteurs : réflexion sur un métal, conduction cable électrique.
- Jackson.
- Carpentier, La physique par la pratique : écrantage par une feuille d'aluminium.

Manips :

- Talkie-walkie dans de l'aluminium (exercice corrigé dans Carpentier, la physique en application).

Niveau L2, pré-requis :

- Électromagnétisme dans le vide, milieux dispersifs, plasmas, loi d'Ohm statique.

Introduction

Importance des milieux conducteurs, surtout les métaux.

But : expliquer certaines de leurs caractéristiques (modèle de conduction : généraliser la loi d'Ohm statique au cas harmonique, effet de peau, transparence) à l'aide d'une *modélisation*.

I - Modélisation d'un métal

Idée : modèle et approximations possibles.

1 Modèle de Drude

Dérouler les hypothèses sur transparent. Modèle fluide, notation complexe, arriver à $\gamma(\omega) = \gamma_0/(1 + i\omega\tau)$. OG.

Ne pas tenir compte de la remarque fautive du Cap Prépa $\lambda \gg v\tau$: dans le régime harmonique, on n'utilise pas $E = \text{cst}$ entre collisions.

Dire à quoi on s'attend avec les formes limites (sur l'énergie : transparence, dissipation).

2 Électroneutralité pour $\omega \ll \omega_{en} = 1/\tau$. OG.

On résout en régime harmonique, on en déduit la réponse indicielle.

3 Courant de déplacement négligeable pour $\omega \ll \omega_{pe}$. OG.

Le but est de négliger le courant de déplacement. Trouver une démo plus simple que celle du Cap Prépa : on se place directement dans le cas où $\omega\tau \ll 1$, et les calculs sont simples.

On est dans un ARQS magnétique (mais on peut ne pas en parler).

Maintenant qu'on a le modèle et des approximations *possibles selon le régime de fréquences*, on va pouvoir l'utiliser

II - Basses fréquences : effet de peau

Ici, $\omega \ll \omega_{en}$ et ω_{pe} .

1 Équation de diffusion

Arriver à $\delta = \sqrt{2/(\mu_0\gamma_0\omega)}$.

2 Applications

Les câbles électriques, nécessité de guidage (cable coaxial) à f très élevé car par effet de peau, la section diminue et donc la résistance augmente (exercice traité dans un livre de Garing).

Manip : talkie-Walkie dans du papier d'aluminium (on peut voir l'exercice dans Carpentier). Attention, la géométrie est différente pour le talkie-walkie (onde en incidence normale sur le conducteur) et pour un fil électrique (on impose un champ \mathbf{E} parallèle au fil, et alors ce champ se localise en surface).

3 La limite du conducteur parfait

Parler d'énergie (selon temps ?), brillance des métaux (tout est réfléchi, + surface lisse (pas de diffusion)), voir Bruhat Optique pour des courbes de réflexion en fonction de λ .

III - Hautes fréquences : transparence des métaux

Ici, $\omega \gg \omega_{pe}$.

1 Équation de propagation

La conductivité a toujours la même expression. Reprendre le travail du II mais ne plus négliger j_D dans Maxwell.

Ici on n'a plus électroneutralité, mais on fait l'hypothèse d'onde transverse et donc c'est pareil (idem que la démarche dans un plasma).

Expliquer qu'on fait la limite $\omega \gg 1/\tau$, et qu'il n'y a donc plus de trace des collisions (les électrons n'ont pas le temps).

2 Analogies et différences avec le plasma

C'est pareil (attention : dans le cas du plasma c'est en fait vrai pour tout ω , y compris $\omega < \omega_{pe}$ où on décrit alors l'absorption ; alors que pour un métal c'est uniquement pour $\omega \gg \omega_{pe}$).

Rq : il y a aussi des ondes longitudinales dans un métal, les plasmons, à $\omega = \omega_p$, cf Garing.

Conclusion et ouverture

On a modélisé un métal de façon simple, et on a pu expliquer son comportement face aux ondes électromagnétiques : effet de peau à basses fréquences, transparence à hautes fréquences.

On a pu voir l'analogie et les différences avec un autre milieu conducteur : les plasmas.

On pourrait aussi mentionner les électrolytes (utile en chimie, loi de Kohlrausch), et la différence avec les milieux isolants (diélectriques).

Remarques

Bien se souvenir que ce n'est pas une leçon sur les métaux, mais sur les ondes.

Lire des choses sur les coefficients de réflexion à la surface d'un métal.

LP 29 – Rayonnement dipolaire électrique

Jury :

Ne pas faire que des calculs, insister sur la physique, parler de la polarisation, énergie, ... Trouver une présentation synthétique, dégager les approximations clairement. Présenter des applications. L'application aux antennes doit être connue.

Un milieu homogène ne diffuse pas. Le rayonnement des dipôles induits par l'onde incidente ne contribue dans ce cas qu'à la propagation. (voir remarques)

Une explication qualitative de la décroissance des potentiels en $1/r$, alors que dans ce cas les champs E et B décroissent aussi en $1/r$, serait la bienvenue. (voir remarques)

Plan

Bibliographie :

- **Cap Prépa** PC : suffit presque entièrement.
- Sanz PC.
- **Garing** OEM dans le vide et les milieux conducteurs : couleur du ciel, OG.
- Faroux, Renault, électromagnétisme 2.
- Jackson et Feynman.
- Carpentier : exercice sur une antenne.

Manips :

- Rayonnement dipolaire par des particules dans l'eau. Avec du thiosulfate réagissant avec du HCl. Mettre ~ 10 mL de thiosulfate à 1 M dans 20 fois le volume d'eau. Puis une dizaine de gouttes de HCl. Attendre : la réaction est lente. Si elle est rapide c'est qu'on en a trop mis.

I - Champ rayonné par un système de charges en mouvement

1 Position du problème

Potentiel vecteur dans le cadre de la jauge de Lorenz.

Approximations : zone de rayonnement ($r \gg a$), et ARQS de source (temps de variation des sources $T = \nu^{-1}$ lent devant le temps de propagation au sein du domaine a/c : on voit la source au même temps).

2 Calculs des champs

On détaille pour B seulement, on admet pour E .

3 Structure du champ dans la zone de rayonnement, énergie

Polarisation, décroissance, Poynting, ...

II - Rayonnement dipolaire et matière

1 Modélisation de la matière

La formule du rayonnement dipolaire ne permet pas de conclure, car les atomes excités par le rayonnement le sont avec une amplitude qui dépend de ω : il faut un modèle de réponse de la matière.

Expliquer avec les mains, puis modèle de l'électron élastiquement lié sur transparent.

On se place dans la limite où $\omega \ll \omega_0$ (OG) : le domaine de Rayleigh. La polarisabilité est alors constante.

2 Diffusion de Rayleigh

On explique le bleu et le rouge. On explique aussi la polarisation.

Il faut des OG pour voir à partir de quelle distance l'effet est important. On peut calculer l'atténuation dans le ciel en fonction de la longueur d'onde en écrivant l'équation du transfert radiatif.

Si a est la taille des objets diffusants, il faut $\lambda \gg a$ pour être dans l'ARQS de source. Sinon on sort des approximations, et on a de la diffusion de Mie. Mais il ne faut pas λ trop grand non plus sinon on a simplement de la diffraction.

III - Rayonnement dipolaire et antennes

Détailler plus ou moins selon le temps (voire pas du tout). Voir Cap Prépa et Carpentier éventuellement.

Remarques

A propos des commentaires du jury

“Une explication qualitative de la décroissance des potentiels en $1/r$, alors que dans ce cas les champs E et B décroissent aussi en $1/r$, serait la bienvenue.”

Les termes en $1/r$ pour les champs proviennent de la dérivée par rapport à l'espace de $t - r/c$ lorsque l'on passe du potentiel vecteur aux champs. C'est donc la propagation retardée qui en est à l'origine.

“Un milieu homogène ne diffuse pas. Le rayonnement des dipôles induits par l'onde incidente ne contribue dans ce cas qu'à la propagation.”

En effet, la lumière dans un diélectrique (un prisme par exemple) se propage en ligne droite, sans diffusion (du moins loin des pics d'absorption du matériau, donc dans le domaine de longueurs d'onde où il est transparent). Pourtant, on utilise le modèle de l'électron élastiquement lié aussi bien pour décrire les diélectriques que la couleur bleu du ciel... Alors pourquoi un diélectrique comme du verre ne diffuse-t-il pas la lumière sur le côté du rayon lumineux incident, comme c'est le cas pour le ciel ? La différence entre les deux est que le rayonnement des molécules (des dipôles) du ciel est supposé incohérent : on somme les intensités de tous les dipôles. Dans un diélectrique au contraire, il faut sommer les amplitudes car les ondes sont cohérentes. On voit alors que la lumière se propage en ligne droite (via le principe de Fresnel avec les ondelettes qui interfèrent constructivement uniquement dans la direction de propagation). Pour que la lumière réémise par les dipôles soit incohérente, il faut qu'il y ait plus de λ entre deux dipôles. C'est le cas avec des micelles de lait dans de l'eau, avec le ciel (enfin, presque...), mais pas pour un diélectrique ($d \sim 10^{-10}$ m). (Rq : ce n'est plus vrai près d'une résonance ($\omega \sim \omega_0$ où ω_0 est la fréquence propre du modèle de l'électron élastiquement lié), car alors l'onde est absorbée, et réémise sur les côtés par rayonnement dipolaire. Un des BFR (celui sur les diélectriques ?) fait un commentaire dans ce sens.)

Différents régimes

Voir BUP 996.

En résumé, grossièrement et pour une radiation dans le visible : pour a entre 0.1 nm (en deçà on a moins d'un atome...) et 100 nm on est en diffusion Rayleigh (donc rayonnement dipolaire

tel que présenté dans la leçon correspondante, en particulier l'indicatrice de rayonnement ne dépend pas de a), entre 100 nm et 10 micro en diffusion de Mie (pour a entre 1/10 et 50 fois λ , l'indicatrice de rayonnement dépend de a/λ), entre 10 micro et quelques centaines on a de la diffraction standard (Huygens-Fresnel, la nature du matériau n'influe pas), et au delà de l'optique géométrique.

Noter que Rayleigh a démontré la décroissance en $1/\lambda^4$ de la puissance rayonnée par une analyse dimensionnelle particulièrement simple !

Unicité d'un champ de vecteur étant donnés sa divergence et son rotationnel

Sources : wikipédia, Cap Prépa PC p125, article de Zhou.

On peut voir les équations de Maxwell comme donnant le rotationnel et la divergence des champs. De même, on dispose en électrostatique et en magnétostatique d'équations sur la divergence et le rotationnel de E ou de B .

La question que l'on peut se poser est donc de savoir si la donnée de, par exemple, $\text{rot } \vec{E}$ et de $\text{div } \vec{E}$ à un instant donné et en tout point de l'espace considéré permet de déterminer \vec{E} de façon unique.

- Le théorème de Helmholtz-Hodge (https://fr.wikipedia.org/wiki/Th%C3%A9or%C3%A8me_de_Helmholtz-Hodge) affirme que :

Soit \vec{E} un champ vectoriel de classe $\mathcal{C}^1(\Omega, \mathbb{R}^3)$ où Ω est soit un domaine compact et connexe de frontière $\partial\Omega$ supposée régulière (ou régulière par morceaux), soit \mathbb{R}^3 lui-même.

Alors il existe un champ vectoriel \vec{A} et un champ scalaire V définis sur Ω tels que

$$\vec{E} = \text{rot } \vec{A} - \text{grad } V.$$

Par ailleurs, ces deux champs peuvent être caractérisés par les expressions suivantes :

- Si Ω est compact :

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\text{div } \vec{E}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\omega' - \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \frac{\vec{E}(\mathbf{r}') \cdot d\vec{\sigma}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|},$$

$$\vec{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\text{rot } \vec{E}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\omega' + \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \frac{\vec{E}(\mathbf{r}') \wedge d\vec{\sigma}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}.$$

- Si $\Omega = \mathbb{R}^3$ et si \vec{E} décroît à l'infini comme $O(r^{-2})$, alors les relations précédentes restent valables en ignorant les intégrales de surface.

D'autre part, parmi les champs qui décroissent à l'infini (ce qui est le cas s'ils sont définis par les relations précédentes), la décomposition est unique (ψ n'est défini qu'à une constante près et \vec{A} ne l'est qu'à un gradient près) et les deux termes de la décomposition sont orthogonaux avec le produit scalaire de L^2 , c'est à dire : $\int_{\Omega} \text{rot } \vec{A} \cdot \text{grad } V dV = 0$.

- Dans les autres cas le théorème de HH peut ou non s'appliquer...

- On déduit de ce théorème de Helmholtz-Hodge que :

- Si Ω est compact : Il faut connaître la divergence et le rotationnel dans tout l'espace, et les valeurs de $\vec{E}(\mathbf{r}') \cdot d\vec{\sigma}'$ et de $\vec{E}(\mathbf{r}') \wedge d\vec{\sigma}'$ sur $\partial\Omega$, ie, la valeur du

vecteur \vec{E} sur $\partial\Omega$ (et pas seulement de sa composante normale ou tangentielle).

Il y a alors unicité de \vec{E} , puisqu'il est donné par les expressions ci-dessus.

- Si \vec{E} est solénoïdal (au sens précisé ci-dessous), alors il suffit de connaître son rotationnel dans le volume et sa composante tangentielle sur le bord. Évident puisqu'alors par définition la partie avec V est nulle.

Si \vec{E} est irrotationnel (au sens précisé ci-dessous), alors il suffit de connaître sa divergence dans le volume et sa composante normale sur le bord. Évident puisqu'alors par définition la partie avec \vec{A} est nulle.

- Si $\Omega = \mathbb{R}^3$ et si \vec{E} décroît à l'infini comme $O(r^{-2})$, il suffit de connaître la divergence et le rotationnel dans tout l'espace.

Il y a alors unicité de \vec{E} , puisqu'il est donné par les expressions ci-dessus.

- Dans les autres cas le théorème de HH peut ou non s'appliquer...

- Enfin, ce théorème de HH permet d'introduire des définitions rigoureuses d'un champ irrotationnel ou solénoïdal :

- Un champ est solénoïdal si dans le volume $\text{div } \vec{E} = 0$, et sur le bord sa composante normale $\vec{n} \cdot \vec{E} = 0$.

C'est cette définition qui permet d'avoir le résultat du point ci-dessus.

Physiquement, elle signifie par exemple pour le champ électrostatique qu'il ne doit pas y avoir de charge en volume ($\text{div } \vec{E} = 0$), et pas de charges surfaciques sur les bords ($\vec{n} \cdot \vec{E} = 0$).

- Un champ est irrotationnel si dans le volume $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0$, et sur le bord sa composante tangentielle $\vec{n} \wedge \vec{E} = 0$.

C'est cette définition qui permet d'avoir le résultat du point ci-dessus.

Physiquement, elle signifie par exemple pour le champ magnétostatique qu'il ne doit pas y avoir de courant en volume ($\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = 0$), et pas de courants surfaciques sur les bords ($\vec{n} \cdot \vec{B} = 0$).

Une façon intuitive de comprendre ce théorème est de passer par la transformée de Fourier du champ en question. Ceci n'est alors valable que si elle existe, donc a priori uniquement pour le cas $\Omega = \mathbb{R}^3$ si \vec{E} assez régulier et qui décroît à l'infini comme $O(r^{-2})$. La preuve fournie par la TF est alors rigoureuse :

On peut écrire que $\vec{E}(\vec{x}, t) = \iiint_{\vec{k} \in \mathbb{R}^3} \vec{E}_{\vec{k}}(t) e^{i\vec{k} \cdot \vec{x}} d^3k$.

Or le rotationnel de \vec{E} donne la valeur de $\vec{k} \wedge \vec{E}_{\vec{k}}$, ie de $\vec{E}_{\vec{k}, \perp}$ et la divergence de \vec{E} donne la valeur de $\vec{k} \cdot \vec{E}_{\vec{k}}$, ie de $\vec{E}_{\vec{k}, //}$ (parallèle et perpendiculaire s'entendent par rapport à \vec{k}).

On obtient donc une composante de $\vec{E}_{\vec{k}}$ avec div, et les deux autres avec rot, et donc les trois.

On note que la dépendance en t n'a pas d'impact ici, il suffit de raisonner à t fixé.

Les équations de Maxwell sont-elles complètes

Complètes signifient ici : la donnée de ces équations permet-elle de déterminer les champs (ou faut-il autre chose) de façon unique (unicité) ?

On suppose que l'on se donne les sources $\rho(t, M)$ et $\vec{j}(t, M)$.

On peut ici aussi utiliser la décomposition de Fourier, en espace et en temps cette fois ci :

$$\vec{E}(M, t) = \iiint_{\vec{k} \in \mathbb{R}^3} d^3k \int_{\mathbb{R}} dt \vec{E}_{\vec{k}, \nu} e^{i\vec{k} \cdot \vec{x} - i2\pi\nu t} \text{ et idem pour } \vec{B}(M, t), \rho(t, M) \text{ et } \vec{j}(t, M).$$

Les équations de Maxwell se résument alors à :

$$\begin{aligned} -i\vec{k} \cdot \vec{E}_{\vec{k}, \nu} &= \frac{\rho_{\vec{k}, \nu}}{\epsilon_0}, & -i\vec{k} \cdot \vec{B}_{\vec{k}, \nu} &= 0, \\ -i\vec{k} \wedge \vec{E}_{\vec{k}, \nu} &= -2\pi\nu i \vec{B}_{\vec{k}, \nu}, & -i\vec{k} \wedge \vec{B}_{\vec{k}, \nu} &= \vec{j}_{\vec{k}, \nu} + \frac{2\pi\nu i}{c^2} \vec{E}_{\vec{k}, \nu}. \end{aligned}$$

On note $\vec{k} = k\hat{k}$ avec $k > 0$ et \hat{k} vecteur de norme 1. On peut décomposer $\vec{E}_{\vec{k}, \nu} = E_{\vec{k}, \nu}(\parallel)\hat{k} + \vec{E}_{\vec{k}, \nu}(\perp)$ et $\vec{B}_{\vec{k}, \nu} = B_{\vec{k}, \nu}(\parallel)\hat{k} + \vec{B}_{\vec{k}, \nu}(\perp)$. On a alors :

$$\begin{aligned} E_{\vec{k}, \nu}(\parallel) &= \frac{\rho_{\vec{k}, \nu}}{-ik\epsilon_0}, & B_{\vec{k}, \nu}(\parallel) &= 0, \\ -i\vec{k} \wedge \vec{E}_{\vec{k}, \nu}(\perp) &= -2\pi\nu i \vec{B}_{\vec{k}, \nu}(\perp), & -i\vec{k} \wedge \vec{B}_{\vec{k}, \nu}(\perp) &= \vec{j}_{\vec{k}, \nu} + \frac{2\pi\nu i}{c^2} \left(\frac{\rho_{\vec{k}, \nu}}{-ik\epsilon_0} \hat{k} + \vec{E}_{\vec{k}, \nu}(\perp) \right). \end{aligned}$$

Les deux équations du haut donne les composantes parallèles. Les deux équations du bas sont deux équations couplées, qui sont équivalentes à quatre équations pour quatre inconnues (prendre par exemple $\hat{k} = \vec{e}_z$).

Ceci détermine donc de façon unique les vecteurs $\vec{E}_{\vec{k}, \nu}$ et $\vec{B}_{\vec{k}, \nu}$, et donc par TF inverse les champs $\vec{E}(M, t)$ et $\vec{B}(M, t)$.

On peut aussi remarquer que si on applique ce même raisonnement aux équations de Maxwell dans la matière, on trouve qu'elles ne sont pas complètes (elles ne suffisent pas pour trouver une solution) : il faut en effet alors des relations de constitution.

Existence des potentiels vecteur et scalaire

Une autre question, à laquelle on peut répondre via le théorème de Helmholtz-Hodge également, est celle de l'existence des potentiels scalaire ou vecteur lorsque, respectivement, $\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$ et $\text{div } \vec{E} = 0$. On a les résultats suivants :

- Si Ω est connexe par arcs et simplement connexe (sans “trous”), un champ \vec{E} continu et irrotationnel (au sens où $\text{rot } \vec{E} = \vec{0}$ dans Ω et $\vec{n} \wedge \vec{E} = \vec{0}$ sur $\partial\Omega$) admet un potentiel scalaire.
- Si Ω est un ouvert étoilé et que le champ \vec{E} est solénoïdal (au sens où $\text{div } \vec{E} = 0$ dans Ω et $\vec{n} \cdot \vec{E} = 0$ sur $\partial\Omega$) et de classe \mathcal{C}^1 , alors il dérive d'un potentiel vecteur.
- Dans d'autres cas de topologie, il existe des résultats, ou pas... tout dépend.

LP 45 – Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa PSI.
- **BFR** électromagnétisme IV.
- Tremolet I et II.
- Précis Bréal électrotechnique.
- Feynman, le cours.
- Garing, milieux magnétiques.

Niveau L3, pré-requis :

- Électromagnétisme.
- Magnétisme dans la matière, para et diamagnétisme.

Introduction

On a vu les équations de Maxwell dans la matière, puis on les a utilisées pour étudier le para- et le diamagnétisme. On va maintenant étudier une autre classe de matériaux : les matériaux ferromagnétiques.

Faits expérimentaux :

- Lorsque l'on place certains corps dans un champ magnétique \mathbf{B}_{ext} , ils produisent à leur tour un champ \mathbf{B} , avec soit $\mathbf{B} \ll \mathbf{B}_{\text{ext}}$ (corps paramagnétiques si $\mathbf{B} \propto \mathbf{B}_{\text{ext}}$, corps diamagnétiques si $\mathbf{B} \propto -\mathbf{B}_{\text{ext}}$, soit de façon très forte (corps ferromagnétiques).
- Lorsqu'on retire \mathbf{B}_{ext} , certains ferromagnétiques continuent de produire un champ \mathbf{B} de façon permanente (on obtient un aimant).

Buts :

- Indiquer les propriétés clés des corps ferromagnétiques,
- expliquer pourquoi,
- donner des applications.

I - Lien entre aimantation et excitation magnétique

1 Rappels sur le magnétisme dans la matière

Essentiellement sur transparent, utile aussi pour fixer les notations.

Le champ \mathbf{B} créé par la matière est dû à des dipôles magnétiques (moment orbitaire \mathbf{L} ou de spin \mathbf{S} des électrons).

Vecteur aimantation \mathbf{M} : moment dipolaire volumique. Grandeur lissée. Schéma du BFR.

Deux jeux d'équations. La relation constitutive $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{B})$ ou $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{B})$ est au cœur du problème.

Souligner l'intérêt de H .

Pour des corps paramagnétiques ou diamagnétiques, on a avec une bonne approximation $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$ avec χ_m constant.

Beaucoup plus complexe pour un matériau ferromagnétique.

→ Nous allons d'abord l'aborder expérimentalement, puis expliquer ces expériences.

2 Mise en évidence expérimentale du cycle d'hystérésis

Manip : tracé du cycle avec un anneau de ferrite (Précis Bréal), surprise, il y a un cycle d'hystérésis. Présentation, description.

3 Implications macroscopiques

Il existe des aimants permanents.

Corps durs pour les aimants, doux pour les transformateurs, avantages et inconvénients.

4 Explication microscopique

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = \mathcal{E}_{\text{éch.}} + \mathcal{E}_{\text{dip.}} + \mathcal{E}_{\text{ani. crist.}} + \mathcal{E}_{\text{H}} \quad (5.1)$$

Manip : domaines de Weiss.

Irréversibilité et hystérésis (voir Feynman) : il y a une énergie d'interaction entre la frontière du domaine et un défaut (impureté, dislocation du réseau, ...), qui fait que la frontière reste accrochée un moment, puis passe brutalement de l'autre côté. Ce saut brutal entraîne une onde sonore par magnétostriction, ainsi que des courants induits (car B varie vite), qui dissipent de l'énergie de façon irréversible. La transformation ne peut pas être quasi-statique. Attention : elle l'est pour des déplacements faibles des domaines (petites variations de H) et pour la phase de rotation.

II - Propriétés clés

1 Canalisation des lignes de champ

Avec l'exemple de la plaque en utilisant les relations de passages. Avec plus ou moins de détails selon le temps.

2 Travail perdu lors d'un cycle

Faire la démonstration (ou savoir la faire, elle sera sûrement demandée aux questions).

3 Production de champs forts, électroaimant

On produit des champs importants car un faible champ extérieur B_0 aligne tous les dipôles du matériau, qui produisent alors de façon ordonnée un fort champ B_m .

Exercice simple Cap Prépa, compléments dans Garing (voir remarques).

III - Applications

1 Le transformateur

Rappels sur le transformateur idéal (transparent, cours sur l'induction).

Retour sur l'hypothèse d'idéalité : réluctance (suivre Cap Prépa PSI exercice 19.10).

2 Autres

Plaques à induction, disque dur, paléomagnétisme, ...

Conclusion et ouverture

Champ magnétique terrestre qui nous protège du vent solaire, physique des plasmas et reconnexion magnétique.

Remarques

Ce plan est probablement trop long...

Énormément d'informations et de caractéristiques concernant les aimants :

<https://www.kjmagnetics.com/thickness.calculator.asp>

Divers

- Corps d'aimantation M uniforme : avec un facteur géométrique $A \leq 1$, on a $B_m = \mu_0 AM$. On a $A = 1$ uniquement dans le cas d'un milieu infini (ou d'un tore). Il est alors intéressant d'écrire que $B_m = \mu_0 AM(B_{\text{tot}}) = A\chi/(1 + \chi) \times (B_0 + B_m)$, ce qui permet d'arriver à

$$B_{\text{tot}} = \frac{1 + \chi}{1 + \chi(1 - A)} B_0. \quad (5.2)$$

Dans un barreau ferromagnétique cylindrique infini plongé dans B_0 parallèle à son axe, on a $A = 1$, et donc $B = (1 + \chi)B_0 = \mu_r B_0 \gg B_0$. Mais dans le cas où il est fini, on voit avec le calcul précédent que $A < 1$ entraîne une nette diminution.

- Inductance d'une bobine avec au centre un milieu magnétique : $L = \mu_r \times L_{\text{bobine sans matériaux}}$ (à un facteur géométrique près). Démonstration avec le fait que $H = nI/L$, puis $B = \mu H = \mu_r B_0$, créé par les bobines. Ceci néglige toutefois les effets de bords, qui sont vite importants.
- Dans un tore magnétique entouré d'un bobinage de N spires parcourus par i , on a $H = NI/L$, et donc $B = \mu_r \mu_0 Ni/L$. Mais B est nul en dehors, donc pour exploiter ce champ magnétique il faut aménager un entrefer, qui va tout changer. Dans l'entrefer d'un électroaimant, d'angle d'ouverture α , on a

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 Ni}{2\pi - \alpha + \alpha \mu_r}. \quad (5.3)$$

En général, on a $\alpha \mu_r \gg 2\pi$, et donc $B = \mu_0 Ni/\alpha$. C'est aussi le champ B dans le reste du tore magnétique, car si la section est constante, B l'est aussi.

En réalité c'est encore moins simple, car $\mu_r(B)$ dépend de B , et c'est donc une équation qu'il faut résoudre graphiquement (voir Garing).

- Pour un aimant torique avec un entrefer, on a $H_1 L_1 + H_2 L_2 = 0$, donc H_1 dans le corps de l'aimant est non nul et est opposé à B . Ceci reste valable pour un aimant quelconque (Tremolet II), car on montre que l'intégrale de $-\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}$ sur le volume de l'aimant est égale à l'énergie magnétique dans le reste de l'espace (qui est positive). On déduit de ce dernier point que le point de fonctionnement optimal d'un aimant est tel que $HB < 0$ soit minimal (donc maximal en valeur absolue), et en particulier la valeur de l'aimantation n'est pas l'aimantation rémanente (car $H \neq 0$).

Force sur un corps aimanté

On peut montrer que

$$\mathbf{F} = \frac{\chi_m}{1 + \chi_m} \nabla \frac{B^2}{2\mu_0} \simeq \nabla \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (5.4)$$

Insister sur qui est B , qui est M (total ou pas).

Comparer au cas paramagnétique.

Implications : les aimants attirent les corps ferromagnétiques.

Deux jeux d'équations

Soit avec \mathbf{B} et \mathbf{M} :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}_{\text{libre}} + \mu_0 \underbrace{\nabla \wedge \mathbf{M}}_{\text{courants liés}} \end{cases} \quad \text{et relation } \mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{B}). \quad (5.5)$$

Soit avec \mathbf{B} et $\mathbf{H} \equiv \mathbf{B}/\mu_0 - \mathbf{M}$:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \wedge \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{j}_{\text{lié}} \end{cases} \quad \text{et relation } \mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{B}). \quad (5.6)$$

OG : Paramagnétique : $\chi_m \sim 10^{-5}$ (SI).

Diamagnétique : $\chi_m \sim 10^{-11}$ (SI).

χ_m est sans dimension dans le système international. Dans le système CGS aussi, mais les valeurs sont différentes d'un facteur 4π . Attention donc aux valeurs données dans le Handbook ou le Kittel par exemple.

Hystérésis

Du grec hysteros, être en retard. L'idée étant que lorsque l'on revient à $H = 0$, une aimantation non nulle persiste : l'aimantation est "en retard" sur l'excitation. Cf. <http://www.cnrtl.fr/definition/hysteresis>.

MP 15 – Production et mesure de champs magnétiques

Plan

Bibliographie :

- Quaranta 4.
- Asch, Handbook, Sanz PC.

Introduction

Production par aimant permanent. Lignes de champ.

Applications multiples : haut-parleurs, moteurs électriques, ... À mettre en regard avec les dispositifs étudiés ici.

I - Mesure par fluxmètre

Quaranta IV.

Tracer $B_{\text{fluxmètre}}$ en fonction de $B_{\text{teslamètre commercial}}$, en produisant B avec l'électroaimant (mais peu importe comment).

Rq : Prendre le montage intégrateur avec AO stabilisé (AO spécial à offset très faible). Pas de résistance en parallèle du condensateur, donc pas de limite sur la fréquence du signal à intégrer.

Mesure pas trop locale, mais peut marcher dans la matière.

II - Production avec un électroaimant

1 Champ B en fonction de I

B mesuré au fluxmètre en fonction de I . Montrer l'hystérésis, dire qu'un matériau doux est à privilégier pour ce genre d'appareil.

2 Influence de l'entrefer

Tracer B en fonction de e à I fixé (et on remonte à μ_r et au nombre de spires (qu'on ne connaît pas pour le gros électroaimant, prendre le petit)).

III - Mesure par effet Hall

Sonde à effet Hall.

U_{Hall} en fonction de B (qui est produit par l'électroaimant qu'on vient d'étalonner). Laisser l'offset de la sonde et le discuter (mais travailler à courant constant).

Montrer la linéarité, remonter à $n \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Mesure locale, mais pas dans la matière.

IV - Production de champ uniforme

Bobines de Helmholtz (notice et Quaranta).

Motivation : production de B constant.

Mettre les bobines à une distance R l'une de l'autre (R est leur rayon), afin d'avoir un champ constant au centre.

Mesure de B en fonction de la distance. Tracer aussi la courbe théorique sur Régressi (B d'une

bobine, de l'autre, et la somme). Petite erreur au centre par rapport à la formule, parce que l'épaisseur des bobines n'est pas négligeable devant la distance inter-bobines.

Conclusion et ouverture

Production de champ tournant (manip avec les aimants, stroboscope pour mesurer la rotation) : on utilise la linéarité des équations de Maxwell pour construire le champ que l'on veut.

Remarques

Ordres de grandeur : aimant néodyme, 1 à 1.5 T.

Sonde à effet Hall

Pour annuler l'offset il faut retourner la plaquette ou inverser B . Il est plus simple d'inverser B , mais il faut faire attention à l'hystérésis (qui peut entrer ou non dans les incertitudes). Attention, inverser le courant dans la plaquette ne marche pas.

Fluxmètre

A propos de l'intégrateur : Il faut que le temps de la manip de mesure soit court devant son temps de dérive (l'AO utilisé est spécial (la notice dit AO à découpage...) et possède un offset très faible, ce qui fait que la dérive du montage intégrateur est minime). Il faut aussi que les variations soient rapides : $f \gg 1/R'C$, où R' est la résistance de fuite du condensateur (très grande et qui n'a rien à voir avec celle de la constante de temps de l'intégrateur) (voir Duffait, intégrateur). Je ne crois pas qu'il y ait une fréquence de coupure haute (il y en a probablement une, mais a priori elle n'a rien à voir avec $1/RC$, mais avec les non-idéalités du montage/de l'AO). C'est différent si on met une résistance en parallèle du condensateur (nécessaire si l'AO a un offset non négligeable), qui devient alors la résistance de fuite du condensateur.

MP 16 – Milieux magnétiques

Plan

Bibliographie :

- Quaranta.
- Garing : FeCl_3 .
- Handbook.
- Tremolet.
- BFR4.
- Précis Bréal électrotechnique : transformateur.
- Tec&Doc chimie PC : pour expliquer O_2 et N_2 .
- Garing Milieux diélectriques, Bruhat Optique : explications sur l'effet Faraday.

I - Milieux diamagnétiques et paramagnétiques

1 Lévitation diamagnétique du graphite pyrolytique.

Le morceau diamagnétique est repoussé par le champ B , donc lévite. De plus, le champ est minimal au milieu des quatre aimants, ce qui fait que la position vers le centre est stable.

2 Paramagnétisme de O_2 (faire aussi avec du diazote pour comparer).

Utiliser le petit aimant permanent puissant.

3 Paramagnétisme de FeCl_3 . (Quaranta, Garing, Handbook)

Remonter à χ . Faire $\times 4\pi 10^{-6}$ pour convertir les unités cgs du handbook en SI (voir note de bas de page de BFR4). Ne pas étalonner l'électroaimant : mettre le teslamètre directement pendant l'expérience. Faire les mesures à la descente seulement (et exclure les premiers points) pour s'affranchir de l'hystérésis de la ligne triple et de l'électroaimant.

Transition para/ferro avec le clou (ou pas si pas le temps).

II - Milieux ferromagnétiques

1 Cycle d'aimantation type transformateur.

Tracer la désaimantation avec une commande sinus modulée par une rampe au GBF.
Calcul de l'aire du cycle et du travail perdu par cycle pour un dur et un doux.
Aimantation rémanente, champ coercitif, de saturation, ... pour deux matériaux.

2 Domaines de Weiss

Avec la caméra et le microscope polarisant.

Voir Trémollet pour l'interprétation de la visualisation (pouvoir rotatoire fonction de la direction de l'aimantation).

III - Polarisation rotatoire induite par un champ B

Effet Faraday. Voir montage biréfringence et pouvoir rotatoire.

Remarques

Il n'y a pas le temps de tout faire. Je préférerais enlever le paramagnétisme du dioxygène et les domaines de Weiss, pour faire la manip de la rotation de Faraday (qui est quantitative). Mais c'est selon le goût de chacun.

Effet Faraday

La rotation de Faraday possède deux interprétations : une classique (voir Garing, milieux diélectriques), une quantique (voir Bruhat optique).

L'interprétation classique : On écrit le modèle de l'électron élastiquement lié, avec en plus un champ magnétique. On obtient alors une permittivité matricielle, et les modes propres de propagation dans la direction du champ sont les polarisations circulaires, avec des indices différents.

L'interprétation quantique : La rotation positive est expliquée par l'effet Zeeman (c'est du moins le cas pour les milieux diamagnétiques, alors que les milieux paramagnétiques ont une rotation négative expliquée par l'alignement des moments magnétiques...). Dans un champ B , les niveaux d'énergie sont clivés. Une règle de sélection quantique stipule que les transitions entre niveaux clivés ont lieu pour certaines polarisations du rayonnement émis. En particulier, pour un rayonnement émis ou absorbé selon la direction de B , ce sont les polarisations circulaires. Donc : l'absorption d'un milieu soumis à un champ magnétique, pour des radiations se propageant selon B , est différente pour une circulaire droite ou une gauche. Il faut ensuite se souvenir que les propriétés d'absorption sont liées aux propriétés de transparence (n' et n'' , relations de Kramers-Kronig), donc l'indice optique d'un tel matériau est différent pour une circulaire droite ou une gauche.

Le graphite pyrolytique

C'est un graphite qui possède des liaisons covalentes entre ses plans de graphène, qui sont dues à des imperfections ou défauts. Une propriété importante est qu'un échantillon possède en général une seule direction pour ses plans de clivage, i.e., les plans de graphène sont parallèles entre eux (alors que dans le graphite habituel, ces plans sont orientés aléatoirement). On peut alors imaginer pourquoi il possède une grande susceptibilité diamagnétique (la plus grande connue à T ambiante) : les électrons dans les benzènes peuvent tourner librement et avoir un effet diamagnétique fort.

Ascension paramagnétique

On a $\chi_{\text{sol}} = \frac{n_{\text{FeCl}_3}}{V_{\text{tot}}} \times \chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}} + \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{tot}}} \times \chi_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mol}}$, et on néglige la contribution de l'eau.

Or $\chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}} = \chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}}$, donné par le Handbook en CGS $\times 4\pi 10^{-6}$. Comme $n_{\text{FeCl}_3} = m_{\text{FeCl}_3}/M_{\text{FeCl}_3}$ et $V_{\text{tot}} = m_{\text{tot}}/\rho_{\text{tot}}$ et $m_{\text{FeCl}_3} = w \times m_{\text{tot}}$ (avec $w \sim 40\%$), il vient :

$$\chi_{\text{sol}} = \frac{w\rho_{\text{tot}}}{M_{\text{FeCl}_3}} \chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}}. \quad (5.7)$$

Remarque : on a aussi $\chi_{\text{sol}} = \frac{V_{\text{FeCl}_3}}{V_{\text{tot}}} \chi_{\text{FeCl}_3} + \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{tot}}} \chi_{\text{H}_2\text{O}}$, mais on ne sait pas vraiment quels sont les volumes à prendre en compte (le volume molaire peut changer en fonction de la concentration lors du mélange...). On peut le voir de la façon suivante. On néglige l'eau. On a : $\chi_{\text{FeCl}_3}^{\text{mol}} = M_{\text{FeCl}_3}/\rho_{\text{FeCl}_3} \times \chi_{\text{FeCl}_3}$, où le ρ et le M sont ceux du corps pur, et donc à partir de l'équation 5.7 : $\chi_{\text{sol}} = w \frac{\rho_{\text{tot}}}{\rho_{\text{FeCl}_3}} \chi_{\text{FeCl}_3} = \frac{V_{\text{FeCl}_3}}{V_{\text{tot}}} \chi_{\text{FeCl}_3}$. C'est donc les volumes des corps purs qui interviennent.

Tout sur FeCl_3 : http://www.solvaychemicals.com/Chemicals%20Literature%20Documents/Chlorinated_inorganics/PCH-1610-0001-W-EN_WW_.pdf.

Autre

Effet Meissner : supraconducteur dans de l'azote liquide, on place un aimant au-dessus. Les

lignes de champ ne peuvent pas pénétrer le supraconducteur (diamagnétisme parfait), et donc l'aimant reste à une certaine distance au dessus.

MP 19 – Effets capacitifs

Plan

Bibliographie :

- Dictionnaire de physique, Handbook.
- Duffait, Électronique.
- Quaranta.

Introduction

Composant de base, et effet électromagnétique présent partout. Il faut donc distinguer le dipôle électrique de l'effet général.

I - Le condensateur d'Aepinus

Quaranta.

1 Vérification de la loi $C = \epsilon_0 \epsilon_r S / e$.

On a en fait une loi affine : ordonnée à l'origine expliquée par la capacité des fils et des armatures métalliques. Selon le taux d'humidité, on peut trouver $\epsilon_r \neq 1$ (voir remarques).
Rq : donne la même chose à 120 Hz ou 1 kHz avec le RLC-mètre.

2 Mettre du PVC et montrer que ϵ_r change.

II - Mesure de capacité

1 Montage multivibrateur astable (Duffait p.187, qui dit que les vieux C-mètre marchent comme ça).

Tracer $T = f(C)$ droite de calibrage. L'ordonnée à l'origine est due aux fils (la mesurer en enlevant le condensateur).

Prendre des résistances assez grandes pour que l'AO débite $i < i_{\max}$. Et un R pour avoir des temps raisonnables avec des capa de l'ordre de celle du câble coaxial.

Discuter de la sensibilité de cet appareil, de la fidélité (la précision, donnée par l'incertitude sur la droite).

2 Utilisation pour la mesure du câble coaxial

Puis confirmer la mesure du câble par calcul de la célérité v et de l'impédance Z (en préparation si manque de temps).

III - Utilisation du dipôle électronique : redresseur

Duffait (à convertisseur de puissance).

Faire un détecteur de crêtes, mesurer le taux d'ondulation de la tension redressée pour différentes valeurs de R : fit. On peut remonter à la valeur de C grâce à la pente.

On a une ordonnée à l'origine, qui est une résistance de fuite ? ($2\text{M}\Omega$, c'est un peu faible...).

IV - Détecteur de niveau d'eau

Expliquer le montage. On se sert justement d'un redresseur !

Tracer la droite volume en fonction de la capacité.

Sécher l'éprouvette ?

V - Effets capacitifs parasites, utilisation des sondes d'oscilloscope

Suivre Duffait §II 1.2.3.

Capacité d'un oscilloscope = 20 pF, d'un câble ~ 100 pF. Gênant s'il y a des capacités comparables dans le montage.

Quantifions tout ça :

Faire la mesure de la résistance et de la capacité de l'oscilloscope+câbles avec la méthode de Duffait en mesurant le temps de montée lors de l'envoi d'un créneau.

Montrer qu'en ajoutant une capacité en parallèle de R , on améliore la situation : c'est le principe de la sonde.

Montrer la vraie sonde si temps.

Rq : l'emploi de sondes minimise l'influence des mesures, mais ne l'annule pas. Mettre une sonde bien accordée revient en effet à changer la fonction de transfert oscilloscope+câble en $H = 1$, mais les fonctions de transfert se multiplient entre elles seulement si les impédances d'entrées sont bien adaptées. Lorsque ce n'est pas le cas, on perturbe le système. Cela dit, une sonde $\times 10$ multiplie l'impédance d'entrée de l'oscilloscope par 10, ce qui améliore les choses.

Remarques

Autres

Autre possibilité : le dipôle électronique : application au filtrage.

Il y a aussi le détecteur de présence (qui donne le principe des détecteurs de personnes assises sur les sièges des voitures, ...), les écrans tactiles, ...

Les capacités électrochimiques : gelée conductrice qui s'électrolyse lors de la première utilisation, ce qui dépose une fine couche de molécules isolantes. e est donc très faible, et $C \propto 1/e$ très grand. C'est aussi pour cela qu'il y a un sens de branchement.

Il y a des pertes diélectriques (\sim idem ferromagnétisme) : résistance en parallèle dans le modèle électrocinétique.

En électrotechnique : utilisé pour changer la phase entre i et U .

Dipôle capacité : influence totale.

$\epsilon_r(\omega)$.

Condensateur d'Aepinus

L'humidité de l'air joue un rôle non négligeable¹ sur ϵ_r : on montre que $\epsilon_r \sim 1 + \phi$ où ϕ est le taux d'humidité (entre 0 et 1). De vraies expériences montrent que c'est à peu près correct : $\epsilon_r = 1.04$ à 30%, 1.1 à 50%, 1.2 à 70%, 2 à 100%. Une valeur typique d'humidité est de 50%. Cf http://michel.hubin.pagesperso-orange.fr/capteurs/chimi/chap_h5.htm.

1. On parle ici de permittivité statique ($\omega \sim 0$), qui est différente de celle dans l'optique ($\omega \sim 10^{15}$ Hz), pour laquelle l'humidité n'a que peu d'influence : pour 20 degrés, 1 bar, et 100% d'humidité, l'indice de l'air dans l'optique est $n = 1.0002673$ (cf <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>).

Mesure de capacité

Il y a d'autres montages possibles. Les vieux appareils utilisent la méthode du multivibrateur astable, ou alors placent C en série avec R et L internes, et cherchent la résonance en intensité qui a lieu à $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, ou mesurent le temps de charge lors d'un échelon de tension entre deux valeurs définies.

Les appareils modernes placent la capacité en série avec une résistance, et soumettent le tout à une tension alternative. Ils mesurent la tension aux bornes de la résistance qui donne $i(t)$ et donc cdU_c/dt , qui est d'amplitude $C\omega U_c$, ainsi que la tension aux bornes de la capacité U_c . D'où C par le rapport des deux.

Attention, la capacité dépend de ω .

MP 20 – Induction, auto-induction

Jury : ne pas abuser des manips qualitatives. Dégager la notion d'inductance mutuelle.

Plan

Bibliographie :

- Quaranta III et IV.
- Duffait électricité.
- Cap Prépa.
- Garing.

Introduction

À l'origine : la loi de Lenz.

I - Loi de Faraday

1 Force électromotrice induite

Montrer la fem induite (sans intégrer) quand on passe dans l'électroaimant ou dans un aimant (induction de Lorentz), puis en laissant la bobine fixe et en bougeant l'aimant (induction de Neumann). Interpréter le sens du courant (en connaissant le sens du bobinage).

2 Flux magnétique et fem intégrée

Fluxmètre et électroaimant. On teste $e = -d\phi/dt$ en l'intégrant : $\int e dt = \phi$.

Étalonner l'électroaimant avec le teslamètre. Puis faire les mesures au fluxmètre (avec le montage intégrateur qui va bien, sinon attention à régler l'offset pour éviter les dérives).

II - Mesure d'inductance mutuelle

Quaranta 4.

Utiliser le couple de bobines dédiées, l'une dans l'autre. M est écrit dans la boîte.

Encore la loi de Faraday : $e_2 = -d\Phi_{1 \rightarrow 2}/dt = -M di_1/dt$ (on vérifie donc aussi la loi de Faraday, à condition d'admettre que $\phi \propto i_1$).

Montage : prendre R grand comme dans Quaranta (2000 ohms) pour imposer un courant (la ddp est essentiellement aux bornes de R).

III - Auto-induction

Utiliser la même bobine que pour l'inductance mutuelle. Dire qu'il y a aussi un flux de la bobine à travers elle-même, qui induit aussi une fem.

1 Mesure d'auto-inductance (QIII et QIV). On illustre le fait qu'il y a une fem, et donc que la loi $u_L = -L di/dt$ est correcte. C'est aussi comme ça que fonctionnent certains inductance-mètres.

2 Mesure de L par résonance, circuit RLC

Avec méthode au choix.

IV - Courants de Foucault

Chute d'aimants dans des tubes

Double rôle de l'induction : pour capter, et en plus on étudie les courants de Foucault. Garing pour la théorie. Ce n'est pas quantitatif.

V - Application au transformateur

Prendre un transformateur démontable (deux bobines et un circuit magnétique feuilleté). Expliquer, et tracer au choix u_2/u_1 , i_1/i_2 , ... Voir MP21 pour plus de détails.

Ouverture et conclusion

On peut montrer des rails de Laplace.

Remarques

Comportement et caractéristiques d'une bobine réelle

Références : article BUP Krob, ainsi que les références de cet article. Peut-être BFR et Bruhat ? Figures sur les listes UPS.

Modèle électrocinétique

R, R//, L et C

R// est là pour tenir compte du fait que la partie réelle de l'impédance augmente avec la fréquence.

Modèle électromagnétique

L'effet de peau augmente la valeur de la résistance de la bobine avec la fréquence. Pour des fréquences inférieures à 10 kHz, un modèle analytique est possible et montre que $R = R_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right)$ (voir Krob).

Au delà les choses sont probablement plus complexes.

Krob fait des remarques qualitatives intéressantes :

- Pour un fil cylindrique rectiligne, l'effet de peau donne une résistance proportionnelle à $\sqrt{\omega}$ si $\delta \ll a$ (δ profondeur de peau, en $1/\sqrt{\omega}$, et a rayon du conducteur). Il suffit en effet de supposer que le courant ne passe que dans une couche de surface $S = 2\pi a\delta$ (voir Krob ou Garing pour une démonstration dans ce cas), et d'utiliser la formule pour la résistance $R = \frac{l}{\sigma S}$.
- C'est pour des fréquences pas trop élevées, telles que δ reste supérieur à a , qu'on montre que l'on a une dépendance en f^2 , en $R = R_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right)$. On a alors :
 - Dans le cas d'un fil cylindrique rectiligne, un effet très faible et non perceptible.
 - Dans le cas du même fil, mais enroulé pour faire un solénoïde, un effet significativement plus important, mais toujours à peine perceptible. L'effet est plus important car il y a un champ magnétique plus important.

- Dans le cas d'un solénoïde multicouches (n couches d'enroulement) le coefficient α étant quasiment multiplié par n . La raison est que le champ magnétique dans une couche est augmenté par le champ des couches qui lui sont extérieures.

Relevés expérimentaux

Article de Krob : bon accord entre forme de la résistance en $R = R_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right)$ avec l'expérience jusqu'à $f = 8$ kHz. Cependant le facteur α n'est pas vraiment donné par sa théorie simple, mais c'est normal au vu des simplifications.

Relevés de $|Z|$ et $\text{Re}(Z)$ sur UPS :

- Effets capacitifs à haute fréquence, mais comportement inductif correct (L constant) sur 10 Hz – 4 kHz.
- Résistance qui augmente significativement dès 1 kHz.
- Tout ceci est très bien modélisé par une association $L, C, R, R_{//}$ avec des valeurs typiques. Tout sauf des pics de résonance à HF, probablement lié au fait que l'on sort de l'ARQS (le fil de la bobine est long!).

MP 21 – Production et conversion d'énergie électrique

Plan

Bibliographie :

- Duffait, Électronique.
- Quaranta : génératrice, transformateur (très complet).
- Précis Bréal, électrotechnique.
- Asch.

Introduction

Fabriquer de la *puissance* avec un bon rendement.

I - Génératrice à courant continu

- 1 Relation électrique** : $U = k\Phi\Omega - rI$, que l'on écrit $U/I = k\Phi(\Omega/I) - r$. Prendre plein de points U , I et Ω (dont des points à $I = 0$ ie en circuit ouvert avec seulement voltmètre, et des points à Ω nominal).
 $U = k\Phi\Omega - rI = RI$ avec une charge R que l'on met pour mesurer I .
 On fait varier la charge R pour changer I . En déduire r et $k\Phi$.
 Relever aussi le couple Γ à chaque mesure pour la suite.
- 2 Relation mécanique** : $\Gamma = k\Phi I - \Gamma_r$ en fonction de I . En déduire $k\Phi$ et Γ_r .
- 3 Rendement** $\eta = UI/(U_e I_e + \Gamma\Omega)$, en fonction de la puissance utile UI et de U/I .
 En déduire les grandeurs nominales. (Se placer à ω fixé?)
- 4 Pertes séparées** : faire le bilan en évaluant, au point de rendement maximal, les pertes (rI^2 , $C_r\omega$, etc... comme dans le Précis Bréal).

II - Le transformateur électrique

- 1 Principe sur le transformateur démontable** (suivre Quaranta IV).
 En circuit ouvert uniquement. Mesurer v_2 et v_1 . Vérifier le rapport en faisant varier n_2/n_1 .
 Montrer que si on ouvre le circuit magnétique : v_2/v_1 n'est plus le bon, et i_1 augmente (c'est un courant non nul dû à la réluctance non nulle du circuit magnétique, voir remarques).
- 2 Fonctionnement nominal, rendement** (Quaranta IV exp IV).
 Prendre un vrai transformateur. Suivre QIV : se mettre à 220 V (v_1 nominal), à fréquence fixée, rhéostat variable, puis mesurer i_2 , i_1 , v_2 , P_1 . Tracer i_1/i_2 et v_2/v_1 . Tracer P_2/P_1 . Le rendement nominal doit être autour de $i_2 = 120\text{VA}/24\text{V} = 5\text{A}$ (en pratique il décroît peu au delà).
- 3 Pertes séparées** (Quaranta exp V)
 On estime les pertes fer en circuit ouvert (Quaranta exp II.4) (car alors le cycle est parcouru de la même façon qu'en charge (c'est contrôlé par v_1), et les courants étant très faibles la puissance consommée est entièrement due au parcours du cycle), et les pertes joules en court-circuit avec le bon i_2 (Quaranta exp III.3) (en secondaire court-circuité il faut alors imposer un v_1 très faible pour avoir i_2 nominal, ce qui fait que les pertes fer proportionnelles à v_1^2 sont négligeables ; la puissance consommée l'est alors quasi-entièrement par les pertes joule dans les enroulements).
 On en déduit $P_2 = P_1 - P_{\text{fer}} - P_{\text{cuivre}}$ qui est à peu près le P_2 mesuré auparavant.
 Rq : les wattmètres ne sont pas très précis à basse puissance (notice).

Promener le fluxmètre autour du transformateur pour mettre en évidence les fuites.

Rq : le ferromagnétique étant non-linéaire, le courant sera non sinusoïdal. Il faut donc utiliser un voltmètre true-RMS.

III - Redressement alternatif/continu

Duffait p. 291 (XII.2).

Redresseur alternatif continu, mesure du taux de redressement avec et sans capacité, puis en fonction de R ou de C dans la limite des taux petits (tracer une droite).

Prendre un transformateur 220/24 et travailler sur le 24 V.

C'est comme pour recharger les batteries (voiture, téléphone, ...).

Remarques

Démarrage du moteur CC

Pas de rhéostat de démarrage, car notre alimentation est variable, mais bien mettre le flux nominal dans l'inducteur pour que Φ soit toujours grand, ce qui permet d'éviter une surintensité dans le circuit de l'induit (car si $k\Phi = 0$ on a $U = rI$ ie que l'induit se comporte comme une résistance r très faible). Alimenter l'induit progressivement : U_{induit} contrôlant ω , mieux vaut éviter les à-coups.

Lors de l'arrêt, il faut également d'abord annuler la tension de l'induit, puis en dernier éteindre l'inducteur, ceci afin d'éviter un emballement ($\Omega = U_{\text{induit}}/(k\Phi)$ (en négligeant r) reste petit si $k\Phi$ est significatif).

Mettre des ampèremètres de contrôle. Parler au jury. Ne pas utiliser de rhéostat de démarrage (c'est inutile avec des alimentations induit et inducteur séparées).

Choix de la génératrice courant continu

La génératrice CC n'est plus utilisée. Même les alternateurs de voitures pour recharger les batteries sont des générateurs synchrones qui sont redressés par des ponts à quatre diodes.

On peut tout de même justifier le choix de la génératrice CC en disant que la génératrice CC est en fait une génératrice alternative redressée mécaniquement (les balais collecteur/redresseur). D'ailleurs la production de courant continu est aujourd'hui réalisée par redressement de l'alternatif via l'électronique de puissance (ce qui est plus fiable que mécaniquement, car les balais nécessitent de l'entretien).

Triphasé

Le triphasé est produit par trois générateurs décalés de 60 degrés : permet d'avoir, à l'équilibre, un courant de retour nul dans le neutre. En pratique, on ne s'affranchit pas du fil de retour (c'est le neutre), mais il est parcouru par un courant très faible (nul à la limite de charges équilibrées), ce qui représente peu de pertes.

RMI

Réaction magnétique d'induit. Le modèle sans RMI indique que le flux du champ magnétique produit par l'inducteur est $\Phi = \Phi(I_{\text{inducteur}}) \propto I_{\text{inducteur}}$ (s'il n'y a pas saturation des pièces

magnétiques).

En réalité on a $\Phi = \Phi(I_{\text{inducteur}}, I_{\text{induit}})$, et la dépendance en le courant dans l'induit fait perdre la linéarité à grands I . (Une autre raison de cette perte de linéarité est que le corps ferromagnétique sature à grand H , ie que B n'augmente plus linéairement avec l'excitation H (qui elle est proportionnelle à $I_{\text{inducteur}}$).

La raison de ceci est que les courants induits dans l'induit produisent à leur tour un champ magnétique qui, par la loi de Lenz, s'oppose au champ magnétique initial. Ceci diminue donc le flux Φ .

Sur les grosses machines il est placé un circuit bobiné sur l'inducteur qui compense cette RMI.

Dans l'équation électrique, on ne prend pas en compte l'autoinductance L du bobinage de l'induit. Comme il s'agit du flux du champ produit par l'induit à travers l'induit, je me demande si ce n'est pas une façon de prendre en compte la RMI.

Transformateur

Le rendement est maximal en court-circuit car alors il faut alimenter avec U_1 faible si on ne veut pas griller. Et alors les pertes fer sont nulles. Mais c'est un peu artificiel.

Transformateur continu-continu : hacheurs. C'est ce qu'il se passe dans les transformateurs de téléphones portables : redressement de l'alternatif en continu puis hachage pour fournir une plus basse tension.

Au branchement, la capacité C s'oppose à la variation de tension, et c'est donc comme si la résistance était court-circuitée : grand courant dans les diodes. En pratique, il y a une résistance dans le pont de diode. Pas trop un souci ici avec du 220 V.

Pourquoi le transport d'électricité est fait à des tensions élevées ? Afin de minimiser les pertes par effet joule sur les lignes. Deux façons de le voir (cf Quantanta 4 p 500) :

- La puissance dissipée est rI^2 avec r la résistance des lignes électriques et I le courant. Il faut donc minimiser I . Si on place un transformateur élévateur de tension (facteur m élevé) en sortie de l'usine de production électrique, le courant sur la ligne est diminué d'un facteur m : on diminue la puissance perdue.

La puissance transportée étant $UI = mU_0 \times (I_0/m)$, elle reste constante.

- La puissance consommée par l'utilisateur (et facturée par edf) est imposée par l'utilisateur. Elle s'écrit $P = UI \cos \phi$. On veut minimiser $P_J = rI^2$ à P constant.

On écrit donc $P_J = r \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \phi}$, et on voit qu'il faut un U élevé.

Réductance et courant magnétisant

On a toujours la relation $N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \Phi$ (c'est $\oint H dl =$ courants enlacés et $H = \mu B$).

On montre que $\frac{l}{\mu S}$ réductance du circuit.

Si $i_2 = 0$, on a $i_1 = i_m$ courant magnétisant.

Noter que Φ est fixé par v_1 puisque $v_1 = -j\omega BSN_1$. Donc à v_1 fixé, Φ l'est aussi. On voit donc que si $i_2 = 0$, on a $i_1 = \mathcal{R}\Phi/N_1$ qui est nul seulement si la réductance est infinie.

Machine synchrone

Fonctionne en moteur ou en générateur (s'appelle alors un alternateur). C'est un alternateur qui équipe les voitures pour recharger la batterie (associé à un pont de diodes pour redresser la tension produite en tension continue). Alternateur pour les dynamos de vélo également.

Machine asynchrone fonctionnant en génératrice

Elle peut fonctionner en génératrice et produire de la puissance électrique. Même avec une cage d'écurie. Pour cela, il faut :

- Que le stator soit alimenté en courant alternatif à ω_0 .
- Que l'arbre soit entraîné en rotation à une vitesse supérieure à sa vitesse de synchronisme $\omega_s = \omega_0/p$.

Cela se comprend intuitivement, car si $\omega < \omega_s$ le rotor doit rattraper le champ tournant du stator et donc les courants induits dans le rotor le font tourner plus vite (fonctionnement moteur), si $\omega = \omega_s$ le champ tournant est statique dans le référentiel du rotor et rien ne se passe, si $\omega > \omega_s$ le rotor va plus vite que le champ tournant et donc les courants induits tendent à le freiner (fonctionnement génératrice, la puissance nécessaire à contrer le freinage est transmise au réseau électrique).

Ce sont des génératrices asynchrones qui équipent la plupart des éoliennes.

Pertes (moteur ou génératrice)

- Pertes par effet joule dans les bobinages.
- Pertes fer dans le circuit magnétique.
- Pertes mécaniques par frottements.

Rendement de la génératrice CC :

$$\eta = \frac{UI}{U_e I_e + \Gamma \omega} \quad (5.8)$$

avec $U_e I_e$ puissance envoyée dans l'inducteur (circuit stator), et $\Gamma \omega$ la puissance mécanique fournie, et UI la puissance récupérée à l'induit.

Ce rendement est à tracer en fonction de UI (le max de la courbe donne alors la puissance nominale d'utilisation), et en fonction de $U/I = R_{\text{charge}}$ (le max de la courbe donne alors la charge nominale (optimale)).

Pertes fer

OG (précis Bréal électrotechnique) : à 50 Hz, de 8×10^{-3} W/kg à 3.6 W/kg selon les alliages. Le /kg signifie par masse du matériau ferromagnétique considéré.

Nature : À la fois les pertes joule par courant de Foucault, et pertes par mouvement irréversible des domaines. Les deux contribuent et ne peuvent être séparés.

Proportionnelle à la fréquence au carré, car si on considère un volume V donné, de taille typique L , alors la tension U aux bornes de ce volume est $U \propto d\Phi/dt \propto \omega$. La puissance volumique dissipée étant en $\vec{j} \cdot \vec{E} \propto E^2$, elle est proportionnelle à ω^2 .

Rq : ceci signifie que l'énergie (qui est la puissance intégrée une fois) est proportionnelle à ω .

MP 35 – Moteurs

Plan

Bibliographie :

- BUP 864 et BUP 846 : moteurs.
- Quaranta : moteurs.
- Précis Bréal électrotechnique.

I - Moteur thermique

Moteur de Stirling

Lancer à vide (sans courroie). Bien faire le 0 du volume (et le refaire si on a des patates). Bécher de glace sur le coté froid (sinon ça chauffe trop).

Tracé du cycle, superposer les isothermes les mieux adaptées, et en déduire $T_c/T_f : \sim 1.5$, (cohérent avec ce qu'on mesure aux thermocouples, attention, mettre les températures en Kelvin). Estimer le rendement de Carnot $\eta_{rev} = 1 - T_f/T_c$, et donc le rendement par rapport à Carnot. Freiner le moteur et montrer que l'aire du cycle augmente (car cette aire est égale au travail fournit par cycle, qui augmente si le moteur doit forcer plus).

Le truc avec la puissance en fonction de la charge ne marche pas vraiment (et la puissance calculée avec l'aire du cycle ne correspond pas à U^2/R).

Voir le BUP 864 sur les avantages et applications du moteur de Stirling. Par exemple, utilisé dans les sous-marins suédois ou dans les sondes spatiales.

II - Moteur à courant continu

Principe avec les rails de Laplace.

Faire la manip. Envoyer un peu plus de 3 A, frotter les rails au papier de verre, on peut l'aider à partir en secouant un peu. Pour savoir où est le nord de l'aimant, prendre une boussole. Se rappeler que le champ magnétique terrestre pointe vers le nord géographique et que donc le nord de la boussole indique la direction du champ.

Moteur (Quaranta, Précis Bréal).

Prendre son temps et tout expliquer, car il n'y a pas énormément de manip dans ce montage.

On peut cependant tracer beaucoup de droites avec ce qui suit.

Fil conducteur : On modélise le moteur par deux équations (électrique et mécanique). Il y apparait trois paramètres. On va (i) voir si ce modèle est satisfait (si ça fait bien des droites), (ii) déterminer les paramètres, (iii) tracer le rendement pour déterminer le point de fonctionnement nominal, (iv) utiliser les valeurs des paramètres déterminés pour faire un bilan des pertes (pertes séparées).

On note Φ le flux magnétique produit par l'inducteur (c-à-d par le bobinage fixe du moteur). Le flux moyen à travers l'induit (c-à-d le bobinage du rotor) est alors $k\Phi$, avec k une constante qui dépend des spécificités précises du moteur (nombres de spires de l'induit, géométrie, ...).

On note U la tension d'alimentation de l'induit, I le courant parcourant l'induit.

On note C le couple sur l'arbre moteur, et ω la vitesse angulaire de rotation.

1 Équation électrique

On trace U/I en fonction de ω/I , qui sont reliés théoriquement par la relation

$$\boxed{U = k\Phi\omega + rI}, \quad \text{que l'on trace comme } U/I = k\Phi(\omega/I) + r.$$

C'est la loi des mailles appliquée au circuit de l'induit : $U - \frac{d\Phi_{\text{tot}}}{dt} = rI$, avec r la résistance de l'induit, U la tension d'alimentation fournie depuis l'extérieur, et Φ_{tot} le flux magnétique à travers le circuit de l'induit, qui donne lieu à une fem en convention générateur donnée par la loi de Faraday, et on notera $\frac{d\Phi_{\text{tot}}}{dt} = k\Phi\omega$.

Vérifier que les points expérimentaux forment une droite. Remonter à $k\Phi$ et r .

2 Équation mécanique

On trace le couple C en fonction de I , qui sont reliés théoriquement par la relation

$$\boxed{C = k\Phi I - \Gamma_r.}$$

C'est le TMC appliqué à l'arbre en régime permanent : $0 = \langle \|\vec{M} \wedge \vec{B}\| \rangle - C - \Gamma_r$, avec C le couple appliqué sur le moteur (donc le couple utile qu'il fournit, mesuré), Γ_r un couple lié à des frottements solides, et $\langle \|\vec{M} \wedge \vec{B}\| \rangle$ le couple moyen électromagnétique qui donne le terme $k\Phi$.

Vérifier que les points expérimentaux forment une droite. Remonter à $k\Phi$ et Γ_r .

→ Comparer la mesure de $k\Phi$ à la précédente (avec incertitudes).

Remarque : On varie le couple que doit exercer le moteur en jouant sur la génératrice. Coté génératrice on a en effet $U_g = RI_g$ avec R la résistance de charge ; et $\Gamma_{\text{fournit par le moteur à la génératrice}} = k\Phi_g I_g = k\Phi_g \frac{U_g}{R}$. Donc on peut diminuer R ou augmenter Φ_g (en augmentant la tension d'alimentation de l'inducteur) afin d'augmenter le couple.

3 Rendement

Se placer à $U_{\text{nominal}} = 110 \text{ V}$ (à lire sur la plaque du moteur). Varier la charge (tension dans l'inducteur de la génératrice, résistance de charge de la génératrice). Tracer en fonction du couple.

4 Pertes séparées

III - Moteurs alternatifs

Trois bobines avec ferromagnétique au centre pour augmenter le champ. Montage en étoile avec trois rhéostats pour limiter le courant, alimenté par une source en triphasée. Ceci produit un champ tournant au centre.

Au centre des trois bobines, on peut placer :

- Aiguille : moteur synchrone. Montrer au stroboscope que c'est synchrone. Pour être sûr de la vitesse, on peut augmenter la fréquence du stroboscope jusqu'à voir quatre aiguilles, puis diviser par 4.
- Cage d'écureuil ou dé à coudre : moteur asynchrone. Montrer au stroboscope qu'il y a une vitesse de glissement (en pratique, ça se voit car ça tourne très doucement).

Remarques

Commande des machines synchrones et asynchrones

Commande vectorielle des machines synchrones et asynchrones, qui les a rendues compétitives face aux machines à courant continu à partir des années 80 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Commande_vectorielle, électronique de puissance couplé à un calculateur.

Utilisations

Moteurs asynchrones : correspond à 80% des moteurs utilisés dans l'industrie (machine outil, ventilateur, ...), car pas cher, peu d'entretien, bon couple au démarrage.

Électroménager : ce sont des moteurs "universel", ie des moteurs identiques à ceux à courant continu, mais le stator (bobiné) et le rotor sont alimentés en série, si bien que le sens du champ \vec{B} et du courant dans l'induit changent en même temps, le couple résultant est alors toujours dans le même sens, même s'ils sont alimentés en alternatif.

Dans les trains on trouve de tout (MCC, MAS, MS), mais les MCC tendent à disparaître. Puissance typique 1MW à 2MW.

Dans les voitures électriques on trouvait des MCC (Peugeot 106). On trouve aujourd'hui des MAS commandées de façon pointue (Roadster de Tesla Motor par ex.). La tension continue de la batterie est donc convertie en triphasée par un onduleur.

Enfin, les constructeurs optent maintenant pour des MS car meilleur rendement. Soit à aimant permanent (PSA, Toyota), soit à bobine inductrice (Renaut, ...).

On peut aussi noter des curiosités comme le moteur à flux axial en cours d'industrialisation (ressemble au moteur à entrefer plan au programme de cpge 1ère année).

Puissance typique : probablement 100 kW (idem moteurs thermiques).

<http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/technologie/moteur>

<https://www.industrie-techno.com/les-secrets-des-moteurs-des-voitures-electriques.42249>

En pratique au lycée

Attention, il n'y a pas de triphasé dans le lycée où se déroulent les oraux. On peut faire fonctionner la machine asynchrone avec les onduleurs, qui produisent un triphasé à partir du monophasé. Mais : pour cela ils redressent le monophasé en une tension continue, puis la hachent afin de reconstituée un signal d'une fréquence donnée avec un déphasage donné. Ce hachage fait que les signaux sont discontinus (on peut les visualiser à l'oscilloscope de puissance). *Il n'est pas du tout certain que les wattmètres fonctionnent correctement avec de tels signaux !*

Chapitre 6

Ondes

LP 23 – Ondes progressives, ondes stationnaires

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa PC.
- Brébec H-Prépa Ondes.
- Sanz PC.
- Taillet, dictionnaire de la physique : définition d'une onde, d'une onde stationnaire, ...
- Garing.

Manips :

- Ressort.
- Corde de Melde.

Introduction

Manip : le ressort, montrer les ondes longitudinales : c'est clairement une onde qui se propage (par ex. pas de transport de matière).

I -Exemples de propagation

1 Corde vibrante, manip : montrer la corde.

Mise en équation. Couplage tension T /ébranlement y . D'Alembert, c . OG

2 Cable coaxial

Juste donner l'équation. Donner c par analyse dimensionnelle. OG. Couplage u, i .

3 Bilan : tableau avec corde, cable (mentionner acoustique et électromagnétisme), et les grandeurs couplées et les célérités : u, i ; T, y ; $\delta p, v$, et pour le ressort de la manip force de rappel, élévation.

Pour la corde, souligner que $c^2 = \text{élasticité/inertie}$.

Définir ondes et propagation (Taillet) : une onde est une perturbation d'une grandeur physique se propageant de proche en proche dans un milieu ou dans le vide. (Valable aussi pour une onde stationnaire si on l'interprète bien.)

De proche en proche : cette propagation ou transmission de la perturbation se fait grâce au couplage entre les deux grandeurs couplées. Par exemple une tension sur la corde induit

un ébranlement, qui va induire une tension, ... Ceci est régi par les équations entre les grandeurs couplées.

II - Solutions en ondes progressives

1 Solutions de l'équation de d'Alembert

Définir (voir les remarques pour plus de précisions) :

onde progressive : déplacement de la perturbation sans déformation,

surface d'onde : lieu continu des points $y(M, t_0) = \text{cst}$,

onde plane : surface d'onde plane, donc dépendance spatiale de type $f(x)$ avec x coordonnée cartésienne,

plane progressive : $f(x - ct)$,

harmonique : dépendance en t harmonique,

plane progressive harmonique.

2 Relation de structure et impédance pour les ondes planes progressives

Relation de structure : lien entre les grandeurs couplées. Impédance : rapport des grandeurs couplées. Cas du câble coaxial : $Z = u/i = \sqrt{L/C}$.

C'est pour une OPP seulement.

3 Transport d'énergie

Le câble coaxial. Rapide sur transparent.

III - Ondes stationnaires

Attention à consacrer assez de temps à cette partie, qui est la moitié du titre.

1 Ondes stationnaires et conditions aux limites

Définir une OS. OS ou OPPH sont équivalentes, mais avec des CL strictes les OS sont plus pratiques.

Solutions de d'Alembert.

2 Oscillations libres avec CL

Ex. de la corde de piano et de clavecin qui sont pincées différemment (triangle ou carré).

Ex. de la corde de Melde.

Indépendance des modes : non-couplage, énergie.

3 Oscillation forcées : résonance

Manip de la corde de Melde.

Conclusion

Points essentiels :

- Phénomène ondulatoire : propagation de proche en proche via les deux grandeurs couplées, célérité, transport d'énergie.
- OPPH ou OS plus pratiques selon les CL (mais dans tous les cas les deux forment une base).
- Modes propres et résonance.

Ouverture sur l'atténuation et la dispersion.

Remarques

Facteur de qualité de l'oscillateur "corde" : on la pince, et on compte le nombre d'oscillations avant relaxation. Noter que $Q = +\infty$ dans le modèle de la leçon.

Définitions

Onde : voir dans le plan.

Mode : solution *harmonique* des équations du mouvement compatible avec les conditions aux limites. Selon les CL, les modes peuvent être des modes de propagation (CL transverses à la direction de propagation, les modes sont alors des ondes progressives), des modes propres (CL le long de la direction de propagation, les modes sont alors des ondes stationnaires), ...

Onde progressive : déplacement de la perturbation sans déformation. (C'est à clarifier...) Le cas $f(\chi - ct)$ où χ est une coordonnée spatiale est un cas particulier, qui n'est pas le plus général (sauf à 1D). Par exemple l'onde $g(M, t) = y^2 \Pi(x - ct)$, où Π est une fonction porte de largeur 1, est progressive. En revanche, $x^2 \Pi(x - ct)$ ne l'est pas, $(1/r) \cos(r - ct)$ non plus.

Surface d'onde : lieu continu des points $y(M, t_0) = \text{cst}$.

Remarque : c'est différent d'une surface équiphasse, qui n'est définie que dans le cas particulier où on peut associer une phase à l'onde, qui doit donc être de la forme $y(M, t) = f(M) \cos(\varphi(M, t))$ (ou la version exponentielle complexe). Selon la dépendance de $f(M)$, les équiphasse et les surfaces d'onde ne coïncident pas nécessairement.

Onde plane : les surfaces d'onde sont des plans parallèles. À chaque plan est associé un vecteur normal n , qui définit la direction de propagation. La dépendance spatiale est de type $f(x)$ avec x une coordonnée cartésienne.

Remarque : Cette définition ne fait pas appel à la phase, et s'applique donc à toute onde. Dans le cas particulier où l'onde a une phase, et s'écrit par exemple $y(M, t) = f(M) \cos(\varphi(M, t))$, alors c'est équivalent à dire que l'onde est plane si les surfaces équiphasse sont des plans parallèles où, en plus, l'amplitude de l'onde y est constante.

Plane progressive : $f(x - ct)$.

Onde harmonique : dépendance en t harmonique.

Onde stationnaire : dépendance en temps et en espace décorrélées (factorisées). Par exemple, les ondes stationnaires solutions de l'équation de d'Alembert sont $\cos(\omega t + \phi) \cos(kx + \psi)$ avec $\omega/k = c$. Attention dans ce cas, k est le nombre d'onde, et non pas le vecteur d'onde (il n'y a pas de sens de propagation).

Onde évanescente : dépend des auteurs...

A propos des bases

OPPH : Pour une fonction $f(x, t)$, on peut la décomposer via la transformée de Fourier en somme continue de $\exp i(\omega t - kx)$, avec sommation sur k et sur ω . Pour être solution de l'équation d'onde, seuls les ω et k compatibles avec la relation de dispersion sont autorisés. On se ramène donc à une somme uniquement sur ω (ou uniquement sur k , au choix).

Ondes stationnaires : Avec la décomposition précédente, on sépare la partie en t et en x dans l'exponentielle, et c'est fini. Sinon, dans le cas de f borné spatialement, on peut voir les choses avec le formalisme des séries de Fourier : on décompose $f(x, t)$ en $\sum_n c_n(t) \cos(k_n x + \phi_n)$, avec $k_n = 2n\pi/X$. En injectant dans l'équation d'onde, on trouve les $c_n(t)$. Dans le cas de d'Alembert, on trouve bien $c_n(t) = \cos(\omega_n t)$ avec $\omega_n = ck_n$.

Globalement, l'idée est de partir d'un ensemble de fonctions qui forme une base de l'espace sur lequel on travaille, et qui soient compatibles avec les conditions aux bords : OPPH, cosinus

avec le bon vecteur d'onde, etc. Et on somme, en prenant garde que chacune soit solution de l'équation (utilisation de la relation de dispersion).

Modes propres de la Terre

La Terre possède également des modes propres de vibration, que l'on peut mesurer lors de la phase de relaxation qui suit des séismes importants (au delà d'une magnitude de 9). La fréquence de ces modes dépend de la structure en densité de la planète, et permettent donc de l'étudier. Le mode fondamental a une période de 53 minutes. (Voir Panorama de la physique, p. 248.)

LP 24 – Ondes acoustiques

Plan

Bibliographie :

- **Cap Prépa** PC : pour un peu tout.
- Sanz PC pour compléter.
- **Hecht**, Physique : ordres de grandeur de bruits (il faut préciser les distances).
- Handbook.
- Garing.

Manips :

- Deux haut-parleurs plus un micro, montrer la linéarité.
- Deux micros et clap : mesure de la célérité.
- Cloche pour montrer l'impédance ?

Niveau L2, pré-requis :

- Mécanique des fluides, équation d'Euler.
- Thermodynamique.

Introduction

Manip : deux micros et clap. On s'en sert plus tard pour rejeter l'hypothèse isotherme. Puis : 2 haut parleurs + 1 micro. Envoyer un triangle + un carré, montrer qu'au micro on a la somme : c'est linéaire ! Ceci va motiver les approximations qui suivront.

On se restreint aux fluides et gaz, donc pas de solides (mais on en parle rapidement, car on utilise la propagation dans du verre par exemple (qui en plus est un milieu amorphe...) lorsque l'on parle d'impédance).

I - L'approximation acoustique

1 Système étudié et approximation acoustique

2 Équation de propagation et célérité

Compétition inertie (ρ) VS raideur ($1/\chi_s$). La célérité $c = \text{raideur}/\text{inertie} = 1/\sqrt{\rho_0\chi_s}$.

Manip : clap et mesure de célérité, confirmation $\gamma = 1.4$.

II - Ondes planes progressives harmoniques en acoustique

1 OPPH

Vitesse de l'onde, OG. Analyse dimensionnelle (ou alors pour le solide ?).

2 Impédance : $Z = p_1/v = \rho_0 c = \sqrt{\rho_0/\chi_s}$.

3 Énergie

Vecteur flux d'énergie $p_1 \mathbf{v}$, densité d'énergie : $\rho_0 v_1^2/2 + \chi_s p_1^2/2$.

Donner des OG, dire que si l'on multiplie les sources par 10 on gagne 10 dB, si l'on double la distance on perd $10 \log(4) = 6$ dB, etc...

4 Retour sur les hypothèses

On n'a plus $p_1 \ll p_0$ à partir de tant de dB. Adiabaticité seulement si $f \ll 5$ GHz.

III - Réflexion et transmission

1 Conditions aux limites, coefficients de réflexion et transmission

p_1 et v sont continus (sauf s'il y a un changement de section : il faut alors décrire le changement en 2D au moins, et on voit que $S \times v = \text{cst}$ et que $p_1 = \text{cst}$).

2 Exemples : double vitrage, échographie, piscine.

Manip de la cloche.

Rq : pour une vitre, il y a deux interfaces : air-verre puis verre-air, donc une atténuation en T^2 (T coefficient de transmission). De plus, l'épaisseur de la vitre n'intervient pas (si on néglige la dissipation dans le verre). En faisant ceci, on néglige les réflexions internes (l'effet Fabry-Perot) ; pour des coefficients de réflexion non proches de 1 ça n'a pas d'importance.

Conclusion

On s'est restreint aux fluides : il y a aussi les solides, la MHD...
Ondes de chocs et cône de Mach.

Remarques

Atténuation dans l'air

Atténuation dans l'air : viscosité, mais aussi activation des degrés de liberté des molécules (Sanz ou Garing).

Condition aux limites à une extrémité ouverte d'un tuyau

(Voir aussi MP30-acoustique pour l'exemple du diapason.)

Autant on comprend bien le cas de la paroi rigide (la vitesse s'annule), autant le cas du tuyau ouvert semble étrange (la surpression s'annule).

Il faut comprendre que la sortie du tuyau se comporte un peu comme un "mur d'air immense", et l'onde sonore s'y transmet très mal. Il y a donc réflexion et il se crée une onde stationnaire.

Ensuite, pour lever un peu l'arbitraire de la condition surpression=0 à l'extrémité ouverte, il peut être instructif de faire l'exercice où on considère un tuyau de section S_1 raccordé à un autre de section S_2 (Sanz PC ancien programme p. 617). Plusieurs choses :

- Si on envoie une onde vers la jonction des deux tuyaux, il va y avoir une onde réfléchie. Intuitivement, on peut dire que la section S_1 des molécules d'air en mouvement va devoir mettre en mouvement une section S_2 d'air, ce qui n'est pas pareil et va donner lieu à une certaine "résistance", et donc une partie de l'onde sera réfléchie.
- Au niveau de la jonction, on utilise le fait que le débit massique est continu : $S_1 u_1 = S_2 u_2$, et que la pression est continue : $p_1 = p_2$ (ce dernier point se démontre si on considère une particule fluide au niveau de la jonction, de section S quelconque et d'épaisseur qu'on fait tendre vers 0 : alors la somme des forces tend vers zéro, et donc $S p_1 = S p_2$).

Avec ces deux points et après quelques calculs, on arrive à une expression pour le coefficient de réflexion $r = p_{\text{refl}}/p_{\text{incid}} = (1 - x^2)/(1 + x^2)$ avec $x = \sqrt{S_2/S_1}$.

Maintenant que ce passe-t-il si on prend le cas limite d'un tuyau ouvert ? Ceci correspond à S_2 qui tend vers l'infini à S_1 fini ($x \rightarrow +\infty$).

- Avec les mains, on peut dire que l'air de la section S_1 va devoir mettre en mouvement de l'air d'une section S_2 infinie, ce qui est impossible. L'onde va donc être entièrement

réfléchi. On va voir que c'est bien le cas. En revanche, ça ne nous dit pas si on a un ventre ou un nœud de pression : les deux sont possibles (et de fait pour un mur rigide on a un ventre de pression et réflexion totale, alors que là on va avoir un nœud de pression et réflexion totale).

- D'après le calcul précédent, ce coefficient de réflexion tend vers -1 si $x \rightarrow +\infty$. Donc à l'ouverture, $r = p_{refl} + p_{incid} = 0$: la surpression est nulle. Cette démonstration a l'avantage de se baser sur des hypothèses raisonnables (continuité du débit massique et de la pression). Noter qu'alors le coefficient de transmission est nul : il n'y a rien qui sort.

En réalité il y en a tout de même un peu. Mais c'est déjà ce que l'on disait au départ : une extrémité ouverte transmet mal le son.

La réalité est évidemment plus complexe, et la surpression n'est ni totalement nulle (sinon on n'entendrait aucun son), ni minimale exactement à la sortie du tuyau. (Par exemple une des hypothèses fausses est que l'onde à l'interface n'est pas plane, et on ne peut donc pas utiliser l'expression simple pour l'impédance (le rapport entre p et v .) Il faudrait voir une simulation numérique de tuyau sonore, ou trouver un article de recherche là dessus. On peut voir par exemple le BUP 889(2).

Rq : le cas du mur rigide correspond à $x \rightarrow 0$ et on trouve que r tend vers 1, donc la vitesse s'annule.

LP 25 – Propagation dans un milieu dispersif

Plan

Bibliographie :

- **Sanz** PC nouvelle édition pour le plan.
- **Portelli** : tout sur le paquet d'onde.
- **Carpentier**, La physique en applications : pour le GPS.
- **Sanz** PC ou PSI ancienne édition : le câble coaxial résistif + OG.

Manips :

- Câble coaxial.

Niveau L2, pré-requis :

- Propagation non-dispersive.
- Transformée de Fourier.
- Électromagnétisme.

Introduction

On a déjà vu la propagation dans des milieux non dispersifs, régie par l'équation de d'Alembert : pas de déformation du signal, vitesse = célérité.

Manip avec le câble coaxial : on voit que ce n'est pas le cas.

But : exhiber un milieu dispersif et le mettre en équation ; se donner des outils pour étudier la propagation.

I - Exemple de milieu dispersif : le plasma dilué

1 Modélisation

Modèle fluide, dérouler les hypothèses à mesure sur transparent.

2 Relation de dispersion

Cas $\omega > \omega_p$ et $<$, introduire dispersion, atténuation (qui n'est pas une absorption ici, car pas de puissance cédée au milieu, l'onde incidente est en fait réfléchie).

II - Outils pour la propagation d'un signal

1 Paquet d'onde

Insister sur la démarche : OPPH n'existent pas, mais facile à traiter, donc on décompose le signal réel en OPPH.

2 Évolution du paquet d'onde

Ordre 1 : enveloppe + porteuse, $v_g(\omega_0)$. Image.

Ordre 2 (sans calculs) : déformation.

III - Illustrations concrètes

1 Retour sur le plasma

Énergie (transparent sans calcul), tracer v_ϕ et v_g .

2 GPS et ionosphère (seulement si temps), exercice et données dans Carpentier.

3 Le câble coaxial. Important car retour sur la manip. OG du Sanz.

Conclusion et ouverture

Message : information et énergie se propagent à v_g et déformation.

Ouverture : on peut aussi expliquer les ondes produites par des cailloux dans l'eau. Mentionner la propagation guidée qui introduit de la dispersion, même dans le vide.

Remarques

J'ai présenté cette leçon durant l'année. La partie III a été très courte, avec seulement le plasma sur transparent et le câble coaxial, sur transparent aussi.

Cable coaxial

Attention, ne pas attribuer la décroissance de l'amplitude des pulses à de l'atténuation : pour bien faire les choses il faudrait calculer l'aire sous la courbe (et réfléchir aux impédances avec l'oscilloscope...).

La propagation est toujours subluminaire

Jackson, §7.5 et après. Étude de la propagation d'un signal quelconque dans un milieu avec un indice $n(\omega)$ quelconque. On envoie le signal d'un côté, on le reçoit de l'autre. On peut alors montrer que jamais rien ne se propage plus vite que c . Côté réception, on observe (indépendamment de la nature du signal envoyé) un précurseur qui voyage à c . Il est d'amplitude très faible et oscille à ω_P . Il y a ensuite un second précurseur, puis le signal "normal" qu'on a envoyé (dispersé et atténué).

Jackson discute également de la dispersion anormale. Arrive lorsque $dn/d\omega < 0$ et grand. D'après les relations de Kramers-Kronig, ceci correspond aussi à des zones d'absorption fortes. Ceci arrive systématiquement lors de résonances. La notion de vitesse de groupe n'a alors plus le sens de vitesse de propagation de l'information ou de l'énergie. Cependant, on montre que tout reste causal (cf. au-dessus).

GPS

Il faut au moins 4 satellites, car il y a 4 inconnues : x , y , z , et t (position du récepteur et temps de réception). Le temps t ne peut pas être connu précisément par le récepteur, car en général il n'embarque pas une horloge atomique ! Il faut donc les 4 équations

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = c(t_i - t), \quad (6.1)$$

où les valeurs indicées i réfèrent au satellite numéro i et sont transmises au récepteur.

Un signal GPS contient diverses informations, dont le temps atomique de l'horloge interne, des paramètres correctifs pour ce temps (liés à la position du satellite et aux effets relativistes), un modèle de ionosphère réactualisé chaque jour, les éphémérides des satellites, ...).

Concernant les retards liés à la propagation dans la ionosphère, il s'agit actuellement d'une des principales sources d'erreur. Elle est corrigée soit en utilisant le modèle d'ionosphère transmis, soit pour les récepteurs habilités (militaires, ...) en utilisant le fait que les satellites émettent sur deux canaux la même chose : à 1575.42 et 1227,60 MHz. Une comparaison des retards entre les deux signaux permet une correction précise du délai. Remarquons qu'à contrario ces signaux, lorsque reçus par une station fixe de position connue, servent à analyser la composition de la ionosphère. (Et d'ailleurs, il y a aussi la troposphère.)

Sources :

<http://zebulon1er.free.fr/gps.htm>,

<http://www-irma.u-strasbg.fr/~baumann/explis.pdf>,

La physique en applications (Carpentier).

Mécanique quantique

Pour un paquet d'onde en mécanique quantique, on arrive à montrer que

$$\psi(x, t) = \psi(x - v_g t) \times \exp \left\{ \frac{\hbar}{i} t \times (p_0 v_g - E_0) \right\}, \quad (6.2)$$

ce qui est un peu différent de la forme donnée habituellement à un paquet d'onde.

La dispersion n'est pas irréversible

Par exemple, on peut reconcentrer un paquet étalé en le faisant passer dans un milieu qui a une relation de dispersion "inverse". C'est ce qui se fait avec les fibres optiques pour compenser la dispersion : on fait passer, de temps en temps, le signal dans des fibres dont la relation de dispersion est "inversée" par rapport à celle de la fibre habituelle (voir Carpentier).

LP 26 – Propagation guidée des ondes

Jury : il n'y a pas que les ondes électromagnétiques et l'optique...

Plan

Bibliographie :

- Brebec, Ondes (H prépa).
- Cap Prépa MP (au programme de MP uniquement).
- Garing milieux conducteurs : le cable coaxial, **Garing** milieux diélectriques : la fibre optique.
- Taillet : fibre optique (mais ne pas faire confiance aux calculs).
- Houard : généralités sur la fibre optique.
- Carpentier : infos sur la fibre optique.

Manips :

- Tuyau PVC avec émetteur et récepteur ultrason.
- Laser et fibre optique.

Niveau L2, pré-requis :

- Ondes électromagnétiques dans le vide, dispersion et absorption des ondes dans un milieu infini.
- Ondes dans les milieux conducteurs, conducteur parfait.
- Interférences à N ondes.

Introduction

On veut transmettre un signal sur de grandes distances, et s'affranchir de la décroissance en $1/r^2$.

Manip : émetteur et récepteur ultrason, sans tube puis avec tube. Avec un tube assez fin, on voit au moins deux modes.

Exemple des Dalton attendant l'arrivée d'un train en collant leurs oreilles aux rails.

Message à faire passer : même dans le vide, la présence de conditions aux limites entraîne de la dispersion. Insister sur les modèles électromagnétiques, la structure des champs, le transport de l'énergie.

I - L'essentiel du guidage avec l'exemple de deux plans conducteurs infinis

On détaille un exemple simple mathématiquement, mais qui contient tous les ingrédients essentiels : quantification des modes, pulsations de coupure, dispersion, énergie transportée à v_g, \dots

1 Mise en équations

Ne pas trop en faire : ne pas calculer \mathbf{B} par exemple.

2 Relation de dispersion : dispersion de mode.

Parler aussi des modes TM, qui incluent le mode TEM (qui est similaire au vide).

3 Transport de l'énergie

Flux moyen selon z à la vitesse de groupe (juste indiquer les étapes).

II - Extension à d'autres guides

On généralise rapidement et sans calculs. On insiste sur les similarités et différences.

1 Cable coaxial

Traitement similaire aux deux conducteurs plans, mais en géométrie cylindrique.

Donner l'allure des champs pour le mode TEM, la fréquence de coupure (8 GHz). Voir Garing, où on trouve les fréquences et la structure du TEM.

Rq : Pour les modes TE (ou TM) dans un guide rectangulaire ou coaxial, la démarche est d'écrire l'équation sur B_z si TE (ou E_z si TM), de résoudre, puis d'en déduire les composantes selon x et y . C'est un peu différent pour le guide avec deux plans conducteurs, où on peut chercher directement E_x pour un mode TE (et B_x pour un mode TM).

Pour le mode TEM, dans le cas du câble, on montre d'abord que comme pour tout TEM, on a $\mathbf{E} = -\nabla V$, puis on a une équation sur le laplacien de V .

2 Guide rectangulaire et autres guides

Particularité : TEM n'existe plus.

Application en TP pour n'avoir qu'un mode. On a ce genre de guide dans les fours micro-ondes ?

Donner des OG de fréquences de coupures au delà desquelles on a des modes.

III - Guidage optique dans des diélectriques

Manip : laser dans une fibre.

Rq : on change et on passe à des diélectriques. Les conditions aux limites sont donc plus complexes (ondes évanescentes, déphasages dans l'approche géométrique, ...). Néanmoins, l'idée est exactement la même : la présence de conditions aux limites entraîne une quantification des modes. On va plutôt le voir avec un modèle (approximatif) géométrique.

1 Motivation du modèle géométrique

Décomposition de la solution du guide entre conducteurs plans infinis en somme de deux OPPH, condition sur l'angle.

2 Modèle géométrique de la fibre optique : idem cas précédent, mais il faut aussi réflexion totale.

On en déduit le nombre de modes qui se propagent, la condition pour en avoir un seul.

Dire un mot sur le modèle électromagnétique : ondes évanescentes dans la gaine, mais qui en moyenne ne transportent pas d'énergie.

3 Application à la transmission de données

Blabla, donner des OG.

Conclusion et ouverture

L'essentiel : le guidage permet la propagation sur de grandes distances, mais introduit de la dispersion **intramodale** : la relation de dispersion d'un mode est différente de celle du milieu infini (qui peut par ailleurs déjà présenter de la dispersion), et **intermodale** : les différents modes ne possèdent pas les mêmes relations de dispersion.

Le guidage d'ondes acoustiques introduit aussi des modes (cf expérience du début).

Parler d'adaptation d'impédance pour bien transmettre l'énergie.

Autre exemple : Les ondes internes dans l'océan sont guidées entre la surface et le fond, et il y a des modes.

Remarques

Fibres optiques

Pas de modes dans une fibre à gradient d'indice, car pas de CL strictes mais un milieu qui varie continûment. Toutes les incidences peuvent donc se propager (à condition de rester dans la fibre), et on a donc toutes les incidences qu'on envoie.

Dans la fibre à saut d'indice, il y a en fait des ondes évanescentes sur les bords, mais pas de perte (calculer Π). Regarder aussi l'exercice de Garing sur le sujet.

Sujet A 2003 : fibre à saut d'indice, modèle électromagnétique, parle de mode hybride $H_{1,1}$, et pas de TEM ?

Trois types principaux de fibres optiques (voir Houard pour un résumé efficace) :

- À saut d'indice. Problème : beaucoup de modes s'y propagent, et donc la dispersion modale est importante et limite le débit. La différence de temps de parcours entre faisceau central et faisceau faisant un angle θ_0 est en θ_0^2 . Utilisée pour de faibles distances (en ville par exemple).
- À gradient d'indice. Le profil d'indice est choisi pour que le signal explorant des zones en périphérie aille aussi vite que celui passant par le centre (où l'indice est plus grand, donc le signal plus lent). La différence de temps de parcours entre faisceau central et faisceau incliné d'un angle θ_0 est alors en θ_0^4 .
On est alors limité par la dispersion chromatique du verre de silice (on envoie des paquets d'onde). Utilisée entre villes.
- À saut d'indice et monomode. Le cœur est petit ($a = 5 \mu\text{m}$), et donc comme $a < \lambda$, un seul mode peut se propager. On transmet alors soit à 0.85, 1.30 ou 1.55 micromètres, où l'absorption est minimale. Utilisée pour des liaisons longues distances (transatlantique, ...).
Dans ces fibres, on peut envoyer plusieurs longueurs d'ondes, qui restent indépendantes, et donc multiplier le débit.

Amplificateurs optiques : on place une portion de fibre dopée (la gaine, en fait, qui va booster l'onde évanescente) avec une population présentant une raie d'émission à la longueur d'onde voulue. On réalise une inversion de population, et ainsi, lorsque la fibre est alimentée, l'émission stimulée fait que le signal est réamplifié.

Guides, remarques diverses

Modes TE_m et TM_m . Peut-être vu comme la somme d'une onde incidente et d'une onde réfléchie, mais pas nécessaire : on peut calculer directement en supposant une forme du type $f(x)g(y)\exp(i\omega t - k_g z)$.

Guide d'onde rectangulaire (conducteur parfait) : Modes $TE_{m,n}$ et $TM_{m,n}$. Pas de mode TEM (se voit en écrivant les équations de Maxwell). On a une relation de dispersion par mode : pour un mode donné, une infinité de ω et $k_g(\omega)$ sont possibles.

Le mode TEM n'est possible que si le guide possède au moins deux surfaces à des potentiels différents (pour un guide métallique, pour une fibre à saut d'indice on ne peut pas parler de potentiel). En effet, s'il n'y a qu'une seule surface (comme dans un guide rectangulaire par exemple), alors le potentiel V dont on montre que le champ E d'un mode TEM dérive est constant partout, et donc $E = 0$. Voir Brebec. On montre aussi qu'un mode TEM vérifie $\omega = kc$ comme dans le vide.

Dans l'approche géométrique, on ne prend pas en compte les déphasages aux réflexions (cf Taillet). Ils sont de π pour un guide métallique parfait et la polarisation change, et ils dépendent

de l'angle pour une fibre à saut d'indice, ce qui change les conditions d'interférence. Seul le modèle ondulatoire permet de traiter correctement le problème.

Si les dimensions du guide deviennent grandes, le nombre de modes augmente et on finit par pouvoir l'approximer par un continuum, et donc par pouvoir valider l'approche géométrique.

On peut voir en écrivant les équations de Maxwell que les modes TE et TM sont découplés, d'où l'intérêt de les considérer séparément.

MP 29 – Ondes : propagation et condition aux limites

Jury : “L’existence de conditions aux limites permet l’apparition de phénomènes aussi variés que la réflexion, la réfraction, la diffraction, les interférences”, la résonance, l’étude du transfert d’énergie, ...

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Taillet Dictionnaire de la physique.
- Garing : guide d’onde hyperfréquence.
- Cap Prépa : corde de Melde.
- Quaranta mécanique.
- De Gennes, Gouttes, perles et ondes : cuve à onde.

I - Propagation libre

1 Propagation non dispersive : ondes acoustiques dans l’air

Micro ultrason : envoyer un paquet d’onde, constater l’absence de déformation.

Puis avec une sinusoïde : mesure du déphasage en fonction de d , remonter à c (on sait que lorsqu’on se déplace de λ , on déphase de $\pi/2$).

2 Propagation dispersive : ondes de surface (cuve à ondes).

II - Conditions aux limites

1 Conditions aux limites longitudinales : corde de Melde

Comparer à la valeur déduite de μ et T . Mesurer f au stroboscope (au moins faire semblant).

2 Conditions aux limites transverses : banc hyperfréquence

Plaque métallique au bout (donc système d’ondes stationnaires), mesurer la distance $\lambda/2$ entre deux minima (mesure voltmètre). Relation de dispersion dans Garing. Remonter à c et à la largeur du guide et comparer.

III - Réflexion et transmission, impédance

1 Impédance propagative (cable coaxial) (si temps).

D’abord montrer la propagation d’un pulse et en déduire v . Remarquer que c’est dispersif. Mesurer Z en adaptant l’impédance en bout de ligne, et indépendamment avec la mesure de v et de C .

2 Mesure de l’impédance du verre (si temps).

À travers une plaque de verre (exo Cap Prépa p. 603), cf MP acoustique. Qualitatif car ne marche franchement pas très bien. Utiliser le sonomètre.

Conclusion et ouverture

Fibres optiques et utilisation du guidage pour transmettre de l’information. Généralité des phénomènes ondulatoires. Parler d’optique ! Ouvrir sur le laser dans le tube en plexiglas.

MP 30 – Acoustique

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Taillet Dictionnaire de la physique.
- Duffait Capes.
- Quaranta 1.
- BUP 804.
- Cap Prépa.

I - Illustration des propriétés ondulatoires

Il s'agit d'une onde, par exemple lorsque l'on parle il y a de la diffraction, ce qui permet de nous entendre dans toutes les directions. On va l'illustrer plus quantitativement.

1 Battement des diapasons

Mesurer les fréquences de chaque diapason seul, puis la porteuse et enveloppe des deux en même temps.

II - Célérité des ondes sonores

1 Dans l'air en fonction de T : tube de Kundt

Faire en montant la température. Tracer une droite et remonter à γ , exclure l'hypothèse isotherme.

2 Dans l'eau : Dural.

Motiver en donnant la formule.

Envoyer une vingtaine de cycles et mesurer entre la fin de l'envoi et le début de la décroissance de la sortie.

3 Dans un solide : le Dural.

Insister sur la différence avec les liquides.

Utiliser les angles d'extinction (et non pas les temps de parcours).

Les vitesses sont tabulées dans le Handbook, si on suppose que notre Dural est bien celui du livre.

III - Une application : l'effet Doppler

BUPs 804.

Motivation : la propagation des ondes permet une mesure de vitesse précise et à distance.

Bien expliquer le fonctionnement, prendre des points à l'oscilloscope à différent points (GBF, puis récepteur, puis sortie du multiplieur : composante à δf et à $2f$), puis en sortie du passe-bas.

Applications : vitesse des voitures, des étoiles, du sang dans les veines, ...

Conclusion et ouverture

Beaucoup d'autres types d'ondes : par exemple électromagnétiques, de surface, ... Les ondes acoustiques peuvent d'ailleurs aussi être atténuée (par relaxation moléculaire, viscosité, ...).

Remarques

Tube de Kundt

Il y a présence de modes guidés à haute fréquence. Le critère est que pour avoir un mode guidé, il faut $\lambda \lesssim a$ (à un facteur géométrique près) où a est le diamètre du tube. En effet, lorsque c'est le cas, on peut avoir des OPPH se propageant obliquement. Le critère sur la fréquence est donc $f \gtrsim c/a$, soit environ $350/0.1 = 3.5$ kHz.

Manip Dural

Les transducteurs fonctionnent indifféremment en émetteurs/récepteurs. Il s'agit de matériaux piézoélectriques qui transforment une impulsion électrique en mécanique et vice-versa.

Enlever les bulles d'air s'il y en a.

Fonctionnement d'un micro

C'est un piézoélectrique. Il est donc modélisable par un circuit RLC, et on a donc des oscillations amorties.

Mesure d'un temps de propagation

Pour l'eau : on envoie un pulse.

Ce qu'on voit à l'oscilloscope (le signal de commande) n'est pas ce qui est envoyé par l'émetteur : celui-ci a un temps de réponse. Il y a donc un délai et une incertitude (en particulier, il ne faut pas imposer une ordonnée à l'origine nulle si l'on fait une droite avec plusieurs distances).

À la réception, on reçoit le signal émis avec plus ou moins la même forme (par exemple un train de sinus déformé). Comment mesurer le temps entre émission et réception ?

On peut prendre entre le début de l'émission coté émetteur et le début de réception coté récepteur, ou, si c'est plus facilement repérable, entre la fin de l'émission de l'émetteur et le moment où on a un transitoire de décroissance au niveau du récepteur. Dans ce dernier cas, ne pas hésiter à mettre beaucoup de cycles (un train de sinus avec beaucoup de périodes) pour que le récepteur soit en régime permanent avant que le signal ne se coupe.

Dans tous les cas, on commet une erreur car le récepteur a un certain temps de réponse. Il faut donc rester critique. Cette erreur est sans importance si l'on trace une droite pour différentes distances émetteur-récepteur (temps de propagation en fonction de la distance), car ce délai apparaît uniquement dans l'ordonnée à l'origine (qu'il ne faut donc pas imposer).

Diapason

(Voir aussi LP-acoustique sur la condition au bord d'un tuyau ouvert.)

Essentiel aux orchestres qui doivent accorder leurs instruments sur une même note précisément (sinon phénomènes de battement).

Forme particulière : elle est telle que la majeure partie de l'énergie est dans le fondamental, car la première harmonique est à 6.25 fois le fondamental. (C'est la symétrie qui est en partie responsable de cette sélectivité et de l'important facteur de qualité.)

De plus, les deux branches vibrent de façon transverse en opposition de phase (dans leur plan commun), alors que la tige de la base vibre longitudinalement. Ainsi, on peut le tenir sans le

perturber, et il peut transmettre la vibration à un support.

Sans résonateur, le son est faible, en partie car les deux branches sont en opposition et donc il y a interférence (ou rayonnement dipolaire qui décroît plus vite). De plus, l'antenne est trop courte pour émettre efficacement (une antenne émet efficacement si sa taille est de l'ordre de λ , qui vaut 80 cm ici à 440 Hz). Il faut donc plutôt voir le résonateur comme une antenne adaptée que comme un adaptateur d'impédance.

Paroi rigide : $v = 0$, $p_1 = \text{ventre}$.

Paroi ouverte sur l'extérieur : $v = \text{ventre}$, $p_1 = 0$ car $P = P_0$ (rigoureusement, c'est vrai un peu à l'extérieur de la paroi, donc le volume "pour l'onde" de la cavité est légèrement supérieur).

La cavité est de longueur $\lambda/4$, de sorte que le mode fondamental est celui à λ , et le suivant celui à $\lambda/3$ (ou $3f$), et d'ailleurs les autres harmoniques du diapason (à $6.25f$, etc...) ne sont pas sélectionnées.

La cavité sert en quelque sorte d'antenne pour émettre efficacement l'onde sonore dans l'air (parler d'adaptation d'impédance étant un peu hasardeux).

Résonateur de Helmholtz

Fréquence de résonance dépendant uniquement du volume, et de la section et longueur de l'ajutage d'entrée.

Impédance acoustique

Cloche et réveil (qualitatif).

Exercice Cap Prépa. Mettre de la mousse dans la cloche pour éviter les réflexions. Ou alors utiliser une plaque de verre. On trouve en fait une borne inférieure sur Z_{verre} (on a $Z \sim 10^4$ au lieu de 10^7).

Rq : le facteur de transmission T ne dépend pas de l'épaisseur du verre (c'est déterminé par les interfaces uniquement).

Chapitre 7

Optique géométrique et ondulatoire

LP 30 – Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat

Plan

Bibliographie :

- **BFR** optique : tout.
- **Portelli** : les mirages, Malus, l'équation des rayons lumineux.
- Champeau : eikonale, ...
- Compléments éventuels avec Perez ou Taillet.

Manips :

- Laser dans une cuve à gradient d'indice (avec du sel).
- Prendre un miroir : la lumière emprunte les chemins extrémaux.

Niveau L2, pré-requis :

- Optique géométrique
- Optique ondulatoire

Introduction

On a déjà vu l'optique géométrique et ondulatoire. Aujourd'hui, on va voir une nouvelle approche, qui va permettre (i) d'avoir une compréhension plus profonde de l'optique, (ii) qui se révèle parfois plus pratique.

Fermat : petit historique.

Principe : c'est donc un postulat.

Variationnel : de tels principes sont généraux.

Ici on va voir comment ce principe permet de retrouver l'optique géométrique, puis voir comment il se justifie à partir de l'optique ondulatoire, et pourquoi parfois c'est mieux.

I - Le principe de Fermat et l'optique géométrique

Suivre totalement BFR.

On considère d'abord les rayons lumineux du point de vue intuitif de l'optique géométrique. C'est la trajectoire de l'énergie transportée par la lumière.

1 Le principe de Fermat

Idée ; définir le chemin optique ; énoncé.

2 Propagation en ligne droite**3 Retour inverse****4 Lois de réfraction et de réflexion****II - Surface d'onde et théorème de Malus**

BFR, Portelli.

C'est là que le théorème devient plus fort que l'optique géométrique.

1 Surface d'onde

Définition (surface equi-chemin optique).

Démonstration du théorème de Malus (les surfaces d'onde sont perpendiculaires aux rayons lumineux). Utiliser la démo de Portelli, plus rapide que BFR : On montre à partir de $dL = nds$ (variation le long d'un rayon lumineux par définition de L), que $\nabla L = n\mathbf{u}$.

2 Application au stigmatisme

Deux points sont stigmatiques si (AA') est extrémal (ppe de Fermat).

Explication sur l'exemple de la lentille de pourquoi elle courbe les rayons.

III - Application aux milieux à gradient d'indice

Portelli

Plus loin que l'optique géométrique : les milieux à gradient d'indice.

1 L'équation des rayons lumineux

Suivre Portelli (admettre qu'on trouve l'équation à partir de $\nabla L = n\mathbf{u}$).

Faire le changement de variable proposé par Portelli ($da = ds/n$) pour la mettre sous la forme du PFD, ce qui facilite l'interprétation dans la suite.

2 Mirages

Explication, loi de Gladstone, calcul dans le cas linéaire.

3 Fibre optique (si temps, probablement pas)**IV - Lien avec l'optique ondulatoire, interprétation du principe**

BFR appendices.

On reprend un point de vue ondulatoire : $s(M, t) = A(M) \cos(\omega t - \phi(M))$.

On rappelle que l'optique géométrique se déduit des équations de Maxwell à la condition que $A(m)$ varie peu devant $\phi(M)$, et donc peu sur des échelles de l'ordre de λ . Alors, l'onde est localement plane avec $\mathbf{k} = \nabla\phi$.

On démontre alors à partir des équations de Maxwell l'équation iconale : $\nabla\phi = n\mathbf{u}$.

Rayon lumineux : trajectoire de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique (BFR).

1 Le chemin optique est la phase de l'onde

Plutôt évident. Les surfaces d'ondes définies ici sont donc des équiphasas.

De plus, on voit que l'équation iconale est celle démontrée à partir du principe de Fermat ! (voir aussi Champeau)

2 Interférences destructives et principe de Fermat

Expliquer avec les mains que le long d'un chemin non-stationnaire, les différentes ondes vont arriver déphasées et vont interférer destructivement : l'énergie n'est pas transportée par là.

En revanche, on a interférences constructives si le chemin optique (donc la phase) est

stationnaire. (Voir aussi Champeau, au principe d’Huygens-Fresnel.)
On peut faire l’exemple du réseau (voir remarques).

Remarques

C’est probablement beaucoup trop long ainsi. Il faut aller vite sur l’application aux mirages, et ne pas faire la fibre optique.

Un exemple où la lumière prend le chemin maximal

À l’intérieur d’une cavité sphérique dont la surface est réfléchissante, pour aller d’un point A à un point B tous deux situés sur la surface de la sphère et diamétralement opposés.

Note sur “pourquoi le chemin stationnaire”

Formule des réseaux :

$$a(\sin \theta - \sin \theta_0) = p\lambda, \quad (7.1)$$

avec p un entier et a le pas du réseau, car pour des interférences à N ondes l’amplitude dans la direction θ est

$$s(\theta) = \text{cst} \times \sum_k \exp \left\{ \frac{2i\pi}{\lambda} ka(\sin \theta - \sin \theta_0) \right\}, \quad (7.2)$$

et ce n’est constructif que si la formule des réseaux est satisfaite.

Si on considère une réfraction sur un dioptre (indices n_0 et n de part et d’autre), c’est comme si on avait un réseau de pas nul. Il n’y a alors aucun espoir d’avoir des interférences constructives, et on a de la lumière que dans l’ordre zéro, pour lequel la différence de marche entre rayons est nulle. Mais cette différence de marche vaut (pour deux rayons séparés d’une distance a lors de leur impact sur le dioptre) :

$$\delta = a(n \sin \theta - n_0 \sin \theta_0). \quad (7.3)$$

Alors $\delta = 0$ donne la relation de Snell-Descartes.

Donc pour le dioptre (ou la propagation libre si $n_0 = n = 1$), on a partout des interférences destructives, sauf au niveau de l’ordre 0. C’est en fait général si l’on exclu les effets de diffraction et les effets de type “réseau” qui réduisent les rayons à un nombre fini (qui permet d’avoir $\delta = p\lambda$ pour ces rayons). On a en fait ainsi démontré le principe de Fermat : les rayons lumineux passent par les trajets de chemin optique stationnaire, i.e., pour lesquels la différence de marche entre rayons voisins est nulle (en $O(\epsilon^2)$).

En particulier, la lumière ne choisit pas, elle passe partout, et n’interfère constructivement qu’en des endroits privilégiés. On peut s’en convaincre en coupant une partie du faisceau arrivant sur le dioptre : la diffraction fait alors que des trajets non empruntés le deviennent. Ils l’étaient donc déjà avant, mais d’autres rayons (maintenant coupés) les détruisaient en interférant. Ça marche aussi si $n = n_0 = 1$.

Un autre exemple consiste à empêcher la lumière de passer sur le dioptre en des endroits périodiques (à former un réseau, en clair). Alors d’autres directions, auparavant en interférences destructives, deviennent constructives.

Feynman (Lumière, matière, une histoire étrange) donne un peu la même interprétation, mais avec de la mécanique quantique, des photons et des probabilités.

Voir aussi p. 162, “Origine de la diffraction”.

LP 31 – Interférences à deux ondes en optique

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa PC.
- Sanz, Tout en Un PC : OG des temps de réponse et des durées de trains d'onde.
- Sextant pour la spectroscopie
- H-Prépa (Brebec, optique ondulatoire).
- Champeau pour précisions techniques sur Wiener-Kinchin, ...

Manips :

- Fentes d'Young
- Michelson en lame d'air

Niveau L2, pré-requis :

- Optique géométrique
- Théorème de Malus
- Modèle scalaire de la lumière
- Transformée de Fourier

Notion centrale = cohérence.

Moyennage quadratique du détecteur + processus d'émission à la source font qu'on observe, ou non, des interférences. Illustrer absolument expérimentalement. A priori on somme les champs, sauf si non cohérents : alors sommer les amplitudes suffit.

À chaque fois, manipuler avant, poser des questions, et y répondre.

Introduction

Éclairer une bifente avec un laser : on a des interférences. Faire de même avec un laser pour chaque fente : on n'a plus d'interférences. Le faire en lumière blanche : rien non plus ?

On va comprendre ce qu'il se passe. Il faut commencer par décrire la façon dont une source lumineuse se comporte.

I - Description ondulatoire

Sanz Tout en Un.

1 Capteurs, sources ponctuelles

Rappeler le modèle scalaire de la lumière : $s(t) = s_0 \cos(\omega t - kx)$, avec l'éclairement proportionnel à $|s_0|^2$.

Parler des capteurs : tableau avec les temps de réponse.

Parler des sources : désexcitation des atomes, émettent des trains d'ondes $s(t)$ de durée finie τ_c .

TF de ces trains d'onde : profil spectral $A(\nu)$.

Tableau avec les temps de réponse des détecteurs / avec les durées des trains d'onde (Tout en Un) → il faut moyennner l'éclairement sur beaucoup de trains d'ondes.

Aboutir au modèle $s(t) = s_0 \cos(\omega t - k(SM) + \phi(t))$.

2 Interférence à deux ondes

Faire le calcul $\langle |s_1(t) + s_2(t)|^2 \rangle$, par étapes :

montrer qu'il faut $\omega_1 = \omega_2$; montrer qu'il faut une source unique ; montrer que la différence de marche ne doit pas excéder la longueur d'un train d'onde (cohérence temporelle).

Aboutir à l'expression usuelle avec le chemin optique.

Attention : on peut faire le calcul en complexes uniquement si on suppose déjà les ondes cohérentes temporellement ($\omega_1 = \omega_2$), donc ici on le fait en réels.

II - Figures interférentielles et dispositifs interférentiels

Dans cette partie, on suppose avoir les cohérences spatiale et temporelle.

1 Figures d'interférence (Cap Prépa)

$(S_1M) - (S_2M)$ constant défini des hyperboles.

2 Les fentes d'Young

Interfrange.

3 Autres dispositifs

Interféromètre de Michelson (en lame d'air) : rapide avec les sources fictives (notion de chemin optique), équivalence à la lame d'air.

III - Cohérence spatiale

Élargir la fente source sur la manip des trous d'Young. Ce qu'il se passe : les points sources sont incohérents, donc produisent des interférogrammes différents, décalés (cf calcul précédent). Il faut en fait que $\delta(S, M)$ varie de moins que $\lambda/2$: donner des OG (voir le H-Prépa), retour sur la manip. **Manip** avec des transparents coloré, superposer deux interférogrammes décalés.

Faire le calcul pour les fentes d'Young (ou le passer si temps), résultats, interprétation : contraste $\Gamma(b)$ (le même pour tout l'interférogramme), il faut $b/d < \lambda/a$, définir la longueur spatiale de cohérence (ou plutôt l'angle de cohérence).

IV - Cohérence temporelle

On relaxe l'hypothèse d'une source monochromatique.

1 Cas d'une raie rectangulaire de largeur $\Delta\sigma$

Calcul ou pas, interprétation. Le contraste est local : $\Gamma(M)$.

Perte de contraste pour $\delta \sim 1/\Delta\sigma$.

2 Retour sur la notion de trains d'ondes

$1/\Delta\sigma$ est justement $\sim c\tau_c$, donc on retrouve bien le fait qu'un même train d'onde doit interférer.

3 Spectroscopie, cf Sextant à spectroscopie.

Remarquer dans le calcul précédent que, à δ fixé (se placer en M au centre), on a une TF en cosinus de $B(\sigma)$. C'est exact.

Attention : on a par exemple la TF d'une gaussienne centrée en σ_0 , la TF est donc la TF du profil multipliée par un cosinus oscillant à σ_0 . Ex : si $B(\sigma) = f((\sigma - \sigma_0)/2\Delta\sigma)$, alors $I(\delta) = 2I_0[1 + (\text{TF de } f) \times \cos(2\pi\sigma_0\delta)]$.

Ceci montre d'ailleurs que le contraste local est la TF du profil spectral f , i.e., la fonction d'autocorrélation de la source (par Wiener-Kinchin).

Conclusion et ouverture

On n'a pas parlé de polarisation. Ouvrir sur l'utilité des dispositifs à division d'amplitude : permettent de s'affranchir de la cohérence spatiale. Ouvrir sur la diffraction.

Remarques

Wiener-Kinchin et Van-Cittert Zernike

Le théorème de Wiener-Kinchin dit que la densité spectrale $B(\nu)$ est la transformée de Fourier inverse de la fonction d'autocorrélation temporelle de la source. Cette dernière décroît sur un temps τ_c (c'est la taille des trains d'ondes dans le modèle simple). On retrouve donc le résultat du I, i.e. $\tau_c \times \Delta\nu \sim 1$, sous forme rigoureuse.

Le théorème de Van-Cittert Zernike est le pendant spatial de celui de Wiener-Kinchine. Il dit que la distribution d'intensité de la source est la transformée de Fourier inverse de la fonction de cohérence mutuelle. Lorsque l'on a une source large, on intègre sur la source, et il apparaît donc que $I(M)$ est la TF en cosinus de la distribution d'intensité de la source. On peut montrer que l'on aura alors un contraste global égal à la TF de la distribution d'intensité de la source, et donc, égal à la fonction de cohérence spatiale.

En vrai, on fait plutôt l'inverse : on fait un gros calcul de l'intensité qui montre que le contraste local est égal à la fonction d'autocohérence temporelle ou à la fonction de cohérence spatiale, et par Wiener-Kinchine ou Van-Cittert Zernike, on en déduit que c'est la TF du profil de raie ou de l'intensité de la source.

Modèle des trains d'onde

Le *modèle* des trains d'onde est un modèle très simple, qui permet d'expliquer et d'interpréter un certain nombre d'observations : nécessité de faire interférer des faisceaux de lumière provenant de la même source, absence d'interférence pour des différences de marche grande (supérieure à la longueur des trains d'onde), lien entre bonne cohérence et largeur spectrale de la source (on a des interférences plus facilement avec un laser qu'avec une lampe spectrale qu'avec une ampoule à filament), ... C'est donc un modèle satisfaisant de ce point de vue.

En revanche, on se rend compte de son caractère simpliste si l'on réfléchit à certains points :

- Si on prend une source de 50 W dans le visible, elle émet un photon toute les 10^{-20} s. Or la longueur d'un train d'onde est de 10^{-15} s pour une lampe à filament, de 10^{-11} s pour une lampe spectrale. Il y a donc un nombre astronomique de trains d'onde émis en même temps et dont il faut sommer l'amplitude. Comme ils ne sont pas cohérents entre eux, on peut argumenter qu'il faut les considérer indépendamment (ou du moins par paquets qui possèdent la même phase à l'origine) et que tout fonctionne bien quand même...
- La longueur d'un train d'onde peut être attribuée à un seul atome se désexcitant seulement si le facteur fixant la largeur spectrale est l'élargissement naturel des raies (via la relation de Heisenberg). Dans le cas le plus courant ce n'est pas le cas. Par exemple dans une source où c'est l'agitation thermique qui impose une certaine largeur spectrale $\Delta\nu$ via l'effet Doppler, on dira quand même que la longueur d'un train d'onde est en $1/\Delta\nu$. Or ce $\Delta\nu$ résulte d'une moyenne sur tous les atomes émetteurs, qui ont des vitesses variées et donc des décalages en fréquence variés. Le train d'onde de longueur $1/\Delta\nu$ résulte donc de la contribution d'un grand nombre d'atomes (ce qui rejoint le point précédent).

C'est donc que la lumière émise par une source ne consiste pas en une succession de trains d'onde bien séparés chacun attribuable à un atome ayant émis un photon. C'est plutôt une succession

continue de trains d'onde, chacun attribuable à un grand nombre d'atomes. Et c'est même, encore mieux, quelque chose du type $\sin(\omega(t)t + \phi(t))$.

Une approche plus réaliste (dans le sens : proche de la réalité) utilise la fonction d'autocorrélation de la source. Cette fonction possède une certaine longueur caractéristique de corrélation (au delà de laquelle la fonction chute vers zéro), qui permet de définir la longueur de cohérence (la longueur des trains d'onde dans le modèle correspondant). On utilise ensuite le théorème de Wiener-Kinchin, qui relie densité spectrale et fonction d'autocorrélation de la source.

Expérience de Fizeau – Δt versus δ

- La différence de phase entre deux ondes arrivant en un point M au temps t est avant tout donnée par

$$2\pi \frac{\Delta t}{T_0}$$

avec Δt la différence de temps de parcours selon les deux chemins empruntés et T_0 la période de l'onde (dans le vide ou non, c'est pareil).

On comprend avec un dessin que c'est toujours valable. En particulier ça ne préjuge en rien de ce qu'il se passe avant l'arrivée au point M de la vibration. Seul compte le décalage des deux vibrations.

Ceci est valide en particulier si la lumière se propage dans un milieu matériel qui bouge (comme dans le fluide en écoulement de l'expérience de Fizeau).

- On montre ensuite que c'est lié à la différence de marche, puisque pour un chemin optique (AB) donné on a

$$(AB) = \int_A^B n(M) dl = \int_A^B n(M) \frac{dl}{dt} dt = \int_A^B n(M) v dt = \int_A^B c dt = ct_B - t_A.$$

Et donc $\delta_{12} = (AB)_1 - (AB)_2 = c\Delta t_1 - c\Delta t_2 = c\Delta t_{12}$.

Mais ceci n'est pas valide s'il y a propagation dans un fluide en mouvement. En particulier, on utilise dans les égalités précédentes le fait que $nv = c$, or dans le référentiel du laboratoire on a plutôt $v = c/n + u$ (ou la formule relativiste correspondante) avec u vitesse du fluide.

C'est pourquoi dans le cas où il y a un milieu matériel en mouvement, il faut utiliser les différences de temps de parcours.

Dernière remarque : cette expérience et ses résultats montrent que la vitesse de la lumière dans un milieu matériel est c/n dans le référentiel où il est immobile, et $\frac{c/n + u}{1 + \frac{(c/n)u}{c^2}}$ dans le référentiel du laboratoire pour un fluide à la vitesse u (cas parallèle). Ce n'est pas évident a priori. Ainsi la vitesse de la lumière est invariante par changement de référentiel dans le vide, mais pas dans un milieu matériel (ce qui se comprend car elle est produite/absorbée par la matière).

LP 32 – Interféromètres à division d’amplitude

Jury :

Indispensable de développer des applications. L’influence de l’extension spatiale de la source est au cœur de la leçon.

Plan

Bibliographie :

- Sextant et Duffait
- **Brébec**, H-Prépa Optique ondulatoire : démonstration du théorème de localisation.
- **Cap Prépa PC**.

Manips :

- Interféromètre de Michelson.
- Interféromètre de Fabry-Perot.

Niveau L2, pré-requis :

- Dispositifs à division du front d’onde.

Introduction

On a vu les interféromètres à division du front d’onde, et le brouillage lorsqu’on étend spatialement la source : c’est problématique pour la lumière. Les questions sont donc : y-a-t-il des dispositifs qui permettent de s’affranchir de ça ? Avec quels outils l’étudier ? (le I) Puis on verra le cas particulier de l’interféromètre de Michelson.

I - Théorème de localisation

Brebec

1 Extension de la source

Au point M , la différence de marche $\delta(S, M)$ varie avec les points de la source.

Il faudrait que ça varie de moins de $\lambda/2$. Mieux : existe-t-il des points M du champ d’interférence tels que δ ne varie pas avec S au premier ordre ?

2 Localisation des franges

Arriver au critère $(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2) \cdot \mathbf{S}\mathbf{S}_0 = 0$.

C’est impossible avec de la division du front d’onde (sauf le cas des fentes ou des trous d’Young : on peut étendre la source dans une direction, car alors $\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2$ est perpendiculaire à $\mathbf{S}\mathbf{S}_0$, à condition que la fente source soit dans le plan médian).

3 Intérêt de la division d’amplitude

On peut avoir $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2$. Deux tels rayons vont interférer quelque part en M . Le lieu de ces points M défini où les interférences seront bien contrastées.

On va donc chercher les points d’intersection des rayons émergents issus du même rayon incident.

II - L’interféromètre de Michelson

Cap Prépa

1 Description**2 lame d'air**, **manip** avec la lampe à sodium.

Construction des sources équivalentes.

Éclairage convergent (plein d'incidences).

Un rayon incident donne lieu à deux émergents parallèles : la figure d'interférence est localisée à l'infini.

Anneaux, calcul du rayon.

Faire remarquer que ce n'est pas qu'à l'ordre 1 : c'est exact.

Application : montrer les battements du sodium, en déduire un OG de l'écart.

3 Coin d'air

Éclairage parallèle. Les émergents issu d'un même incident se coupent proche des miroirs.

III - L'interféromètre de Fabry-Pérot

Cap Prépa, **manip** : montrer l'interféromètre de Fabry-Pérot.

1 Description, et localisation des interférences à l'infini.**2 Finesse**, sans calcul**3 Application au filtre interférentiel****Conclusion et ouverture**

Le laser, détection d'ondes gravitationnelles, ...

 **Remarques****Fabry-Pérot**

On peut sortir un interféromètre de Fabry-Pérot et le faire régler par les techniciens. Il faut toutefois savoir comment il se règle (il faut d'ailleurs leur proposer un protocole de réglage), et savoir répondre aux questions du jury. Il faut donc l'avoir fait une fois dans l'année. Ne pas perdre de temps avec si les techniciens n'y arrivent pas.

Filtre interférentiel

Un tel filtre fonctionne un peu comme un Fabry-Pérot. Bande passante : 10 nm ou moins ? Voir description dans Sextant et/ou Duffait.

Il y a aussi des exercices de prépa sur le sujet au chapitre des réseaux. Les longueurs d'onde qui passent vérifient $\delta_{\text{entre deux rayons consécutifs}} = p\lambda$, $p \in \mathbb{Z}$, soit $2ne = p\lambda$, soit $\lambda = \frac{2ne}{p}$, $p = 1, 2, 3, \dots$ Le reste est réfléchi, et non pas absorbé, ce qui est une différence importante avec un filtre coloré (en plus évidemment d'une bande passante plus étroite).

En glanant des informations sur Internet on comprend qu'il s'agit de deux couches assez épaisses de diélectrique qui emprisonnent une succession de couches de diélectriques très fines (moins d'un micromètre) déposés par des techniques spécifiques. On voit en effet que pour $p = 1$ et $n = 1.5$ pour absorber $\lambda = 500 \text{ nm}$, il faut $e = 166 \text{ nm}$!

L'ordre $p = 2$ correspond alors à laisser passer $\lambda_{p=1}/2$, soit dans l'UV. Il est en général accolé un filtre coloré sur une des faces, pour couper ces pics.

Attention : à utiliser en incidence normale, car sinon la différence de marche entre deux rayons change, et donc aussi les longueurs d'onde passantes.

Mécanique quantique

Une expérience avec un interféromètre de Michelson peut être interprétée de façon quantique si on sait que cela fonctionne de même en envoyant des photons individuels. Dans ce cadre, la destruction des interférences lorsque l'on place des polariseurs au niveau des miroirs peut être vue comme une interdiction de savoir par quelle branche le photon est passé : ces polariseurs permettent effectivement de savoir par quel miroir le photon unique est passé, ce qui détruit alors les interférences. Placer un polariseur à 45 degrés avant l'écran restaure les interférences, ce qui est normal puisqu'on ne peut alors plus savoir d'où le photon vient. Voir la discussion dans "Le monde quantique", d'Espagnat et Zwirn, Séance III.

LP 33 – Diffraction de Fraunhofer

Jury :

Donner clairement les conditions d'application de l'approximation de Fraunhofer. Conditions justement rencontrées dans les appareils optiques : on regarde à l'image géométrique des sources (le plan d'une pellicule, la rétine pour un télescope, ...).

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa.
- Champeau ou Taillet.
- Sextant (démonstration entre Fraunhofer et Fresnel).
- Hecht, Optique : un peu de théorie sur Fresnel, compléments.
- Taillet, dictionnaire : définition du nombre de Fresnel.

Manips :

- Diffraction de Fraunhofer (montage rigoureux).

Niveau L2, pré-requis : modèle scalaire de la lumière, interférences.

Introduction

Manip : mise en défaut de l'optique géométrique quand on ferme une fente. Définition : diffraction lorsque les lois de l'optique géométrique ne sont pas respectées.

I - Principe de Huygens-Fresnel et diffraction de Fraunhofer

1 Principe de Huygens-Fresnel

Énoncé, formule avec le facteur d'angle.

2 Diffraction de Fraunhofer

Premières simplifications : amplitude constante. Reste la phase, qui elle doit se comparer à λ . Cette phase fait intervenir $(SPM) - (SOM)$, DL à l'ordre 2 (à partir de $PM = \sqrt{(\mathbf{PO} + \mathbf{OM}) \cdot (\mathbf{PO} + \mathbf{OM})}$, voir Sextant mais faire plus simple). Apparaît le nombre de Fresnel.

3 Conditions d'application de l'approximation de Fraunhofer

Sextant : à l'infini, à grande distance ($OG : D \gg 2 \text{ m}$ si $a = 1 \text{ mm}$), au voisinage de l'image géométrique.

Importance de ce dernier cas.

4 Diffraction de Fraunhofer : vers l'expression TF-like.

Suivre le Cap Prépa.

II - Figures de diffraction

Cap Prépa.

1 Fente rectangulaire

Calcul, **manip.**

2 Propriétés des figures de diffractions

Translation ; rotation ; dilatation ; théorème de Babinet. Plus ou moins de calculs si temps.

Manip.

3 Trou circulaire et critère de Rayleigh

Pas de calcul. Application au critère de Rayleigh. OG pour l'œil, pour un télescope, un capteur d'APN (Cap Prépa).

III - Optique de Fourier

Manip si temps.

1 Diffraction et transformée de Fourier

Cap Prépa. Expliquer les fréquences hautes et basses en lien avec les angles.

2 Application au filtrage spatial

3 Applications pratiques

Épurateur de faisceau, visualisation d'écoulement par strioscopie, (microscope à contraste de phase¹).

Conclusion et ouverture

Ouvrir sur les réseaux et les interférences, qu'on avait traité de façon idéale : en fait c'est modulé par la figure de diffraction. Ouvrir sur le lien entre HF et le principe de Fermat, les interférences destructives en dehors du chemin de l'optique géométrique, l'intégrale de chemin de l'électrodynamique quantique, ...

Remarques

Diffraction

“Il y a diffraction chaque fois que la lumière arrive en un point autrement que conformément aux lois de l'optique géométrique”. BUP894.

Fraunhofer

Fraunhofer est très intéressant car c'est ce qui a lieu au voisinage de l'image géométrique de la source, donc en fait dans tous les instruments d'optiques (qui font une mise au point). Parce que sinon le nombre de Fresnel est difficilement petit (il faut être à 6 m pour une ouverture de 1 mm).

Origine de la diffraction

Selon le principe de HF, la propagation libre d'une onde (sans obstacle) résulte de la réémission d'ondes sphériques sur toute une surface d'onde, qui vont interférer constructivement partout. Lorsque cette réémission est empêchée (par ex. par un écran opaque percé en son centre), toutes les ondelettes sphériques n'existent plus, et les interférences sont constructives dans une zone de l'espace qui ne correspond plus à l'optique géométrique. C'est la diffraction, qui de ce point de vue a lieu parce qu'on a coupé la surface d'onde incidente.

1. Mais attention c'est compliqué, on traite différemment les hautes fréquences des basses fréquences en déphasant les premières, et ceci ce fait grâce à un filtrage de Fourier.

C'est effectivement ce qu'il se passe dans un milieu mécanique (ondes dans l'eau par exemple). Pour la lumière, qui se propage sans support, la réalité physique est différente mais, heureusement, équivalente². Voir Champeau, ondes lumineuses : On considère d'abord ce qu'il se passe avec un écran opaque qui coupe la lumière. En un point M derrière l'écran, on a le champ émis par les sources plus le champ émis par l'écran (car ses particules sont excitées par l'onde incidente). Cette somme est nulle (car l'écran est opaque). Maintenant, si on ôte un morceau de l'écran, il va manquer une contribution au champ créé par l'écran, ce qui va donner lieu à la diffraction. On montre facilement que le champ en M est alors égale à l'opposé du champ qui serait rayonné par le morceau d'écran ôté seul éclairé par l'onde incidente. D'où la justification du principe de HF pour la lumière : tout ce passe comme si la portion de l'écran non bouchée rayonnait des ondelettes.

Ceci suppose que l'écran rayonne de la même façon troué ou non, ce qui n'est vrai que si $\lambda \ll$ taille du trou. Le principe d'Huygens-Fresnel n'est donc valable que pour des ouvertures de taille $a \gg \lambda$ (pas trop non plus, sinon il n'y a plus de diffraction), sinon les effets de bords sont à prendre en compte, et l'onde transmise dépend alors de la polarisation et du matériau de l'ouverture (métallique, isolant, ...). (Les hypothèses de Kirchoff sont aussi présentées par Jackson, avec également pourquoi on arrive à trois facteurs d'obliquité différents. Mais la discussion est moins physique.)

Par exemple, prenons une grille métallique avec une distance entre les barreaux qui vaut a . Si $a < \lambda$, alors on est dans la situation du polariseur du banc hyperfréquences : on obtient un polariseur. La nature métallique de la grille est essentielle, et elle agit sur la polarisation. Avec la même grille, si $\lambda \ll a$, alors les effets de bords dus à la grille deviennent négligeables, le principe de Huygens-Fresnel s'applique, et on obtient un réseau. Si $\lambda \lll a$, on retrouve l'optique géométrique. Voir aussi p. 185 pour une discussion du polariseur à grille.

Démonstration de la formule de Huygens-Fresnel

Voir Champeau.

L'expression la plus générale fait intervenir le facteur angulaire $Q(\theta_i, \theta)$. Il s'agit d'une formule exacte si les dimensions de la pupille sont grandes devant λ , et si on regarde à une distance grande devant λ . Elle repose sur l'hypothèse de Kirchoff : le champ incident au niveau du diaphragme est égal à celui de l'onde incidente (donc en l'absence d'écran). C'est en réalité inexact car l'écran produit un champ.

Il n'y a pas d'expression unique pour Q : soit $\cos \theta$, soit $\cos \theta_i$, soit la moyenne des deux. Champeau explique que ces trois possibilités se valent, et diffèrent en pratique de moins que ce que l'approximation scalaire implique. On obtient ces différentes formules à partir de différents choix de fonctions de Green, toutes exactes, modulo l'hypothèse approximative de Kirchoff qui fait finalement aboutir à des résultats différents.

Programme

Attention, le principe de Huygens-Fresnel n'est plus au programme de CPGE.

2. Comprendre : le principe de HF n'a aucune réalité physique, puisqu'il n'y a pas de sources secondaires dans le vide qui réémettent l'onde... c'est donc un artifice mathématique, car "tout se passe comme si". À partir de là, il est évident que si on met un obstacle, certaines ondelettes ne sont plus là. Il est évident aussi qu'on néglige ce qu'il se passe sur les bords de l'écran.

LP 34 – Diffraction par des structures périodiques

Plan

Bibliographie :

- Cap prépa et Sanz PC ou PSI.
- Sextant et Duffait.
- Garing : exercice sur l'échographie.
- La physique par les objets du quotidien : échographie.
- Alloul : toute la physique cristalline.
- Ashcroft : complément.

Manips :

- Réseaux
- Le canon à électrons

Niveau L3, pré-requis :

- Principe de Huygens-Fresnel, diffraction par une fente.
- Structure cristalline

Toujours donner des OGs.

I - Diffraction par un réseau en optique

Cette première partie permet d'aborder un thème important en soi, et en fait d'introduire tous les concepts utiles.

Manip : réseau en montage spectromètre.

1 Formule des réseaux

On calcule les maxima d'éclairement.

2 Éclairement exact

Avec Huygens-Fresnel. Identifier le facteur de forme (enveloppe, diffraction par un seul motif) et facteur de structure (interférences multiples) (voir Sextant). Rôle du nombre de fentes N .

3 Application à la spectroscopie

4 Cas du réseau blazé

Sextant. Simplement dire que le facteur de forme est tel que l'intensité est maximale dans la direction de l'ordre 1. (Comme d'habitude en diffraction, l'intensité est maximale dans la direction de l'optique géométrique, d'où le fait qu'il s'agit d'un réseau de prismes.)

II - Réseau acoustique et échographie

1 Principe et contraintes

Il faut des petites longueurs d'onde, pas trop sinon absorption. Il faut un émetteur directif et orientable. Voir la physique des objets du quotidien.

2 L'émetteur ultrasonore

Suivre Garing. Aller vite, car on a déjà établi l'expression avant.

III - Diffraction par des structures cristallines

1 Description du problème

Rayons X ou électrons ou neutrons.

2 Position des maxima

C'est de la diffraction par un réseau 3D. Donner la conditions de von Laue : il faut $(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{R}_n = 2p\pi$ pour tout \mathbf{R}_n appartenant au réseau de Bravais : beaucoup plus contraignant qu'à 1D.

Puis c'est identique au cas 1D : directions avec intensité maximale, modulé par la figure de diffraction d'un motif (le facteur de forme en optique, appelé par Alloul le facteur de structure (donc l'inverse du vocabulaire optique...)).

Méthodes : faisceaux polychromatiques, rotation du cristal, poudre (comme dans la [manip](#) avec les électrons).

Conclusion et ouverture

Fabrication de spectromètres, etc...

Remarques

Réseau optique et résolution

Résolution : largeur de la fente source (dont on voit l'image géométrique), résolution intrinsèque du réseau (largeur des ordres finie et en $1/N_{\text{fentes éclairées}}$), résolution du capteur ou du goniomètre. Tout ceci fixe une largeur finie associée à une raie. Il faut ensuite voir si deux raies se chevauchent ou pas : la séparation angulaire Δi pour un $\Delta \lambda$ donné est établie en différenciant la formule des réseaux. Comme les raies sont mieux séparées dans un ordre élevé ($\sin \theta = p\lambda/a$), on a une meilleure résolution à p grand. Voir Sanz PC.

Facteur de forme et de structure

Pour de la diffraction par un ensemble d'objets identiques, on a :

$$s(M) = \int_{\text{Objet 1}} \exp \left\{ \frac{2i\pi}{\lambda} [(SPM) - (SO_1M)] \right\} t(P) d\Sigma \times \sum_p \exp \left\{ \frac{2i\pi}{\lambda} (SO_pM) \right\}. \quad (7.4)$$

Le premier facteur est la figure de diffraction d'un élément (une fente de largeur b par exemple pour un réseau) (c'est le facteur de forme), le second facteur est le terme d'interférence entre les ondes émises par chaque objet (c'est le facteur de structure). Pour un nombre infini d'objet, le second facteur est nul sauf pour des angles vérifiant la formule des réseaux. Le premier facteur module donc l'intensité dans chaque ordre de la formule des réseaux.

Si on ne fait rien de spécial, le facteur de forme est de type sinus cardinal. Mais si on utilise un réseau blazé, on se débrouille pour que ce facteur soit maximal dans la direction de l'ordre 1 (en fait, ce facteur est maximal dans la direction de l'optique géométrique correspondant aux objets individuels).

Cristaux quasi-périodique ou apériodique

La périodicité n'est pas une condition nécessaire à la diffraction cohérente (i.e. à l'apparition de pics de Bragg). Il faut qu'il y ait un ordre à grande distance, mais pas nécessairement une périodicité stricte. Plusieurs exemples :

- Les quasi-cristaux sont apériodiques, mais diffractent (certains du moins). Cf pavage de Penrose, qui est apériodique.
- Les cristaux apériodique ou quasi-périodique, qui sont des cristaux périodiques perturbés par une oscillation statique de période incommensurable avec le pas du réseau d'atomes. De tels cristaux existent dans un état stable thermodynamiquement dans une certaine gamme de T et P (et E et B). La transition d'un ordre quasi-périodique à un ordre périodique est une transition de phase dite d'ancrage.
- Les cristaux composites incommensurables : alliages avec des composés en proportions non stœchiométriques.

(Source : BUP, Sivardière et Reffet physique 44-45).

MP 7 – Instruments d'optique

Jury :

Connaître les limitations des appareils utilisés, connaître les différentes aberrations, stigmatisme approché/rigoureux, ... différence grossissement / grandissement.

Plan

Bibliographie :

- Sextant et surtout Duffait.
- Houard : aberrations, généralités.

Introduction

Notre œil est très fort, mais limité (OG de la résolution).

I - Étude d'un instrument optique : la lunette astronomique

Duffait.

- 1 Monter la lunette** : produire un objet à l'infini (par autocollimation), puis faire l'œil.
- 2 Vérification de la formule de grossissement.**
Prendre différents couples de focales et faire une droite, remonter à f_1 .
On peut tester les focales par autocollimation.
- 3 Diaphragme d'ouverture** : le montrer, ainsi que la pupille et le cercle oculaire. Mesure du diamètre du cercle oculaire et de sa position, remonter à G .
- 4 Diaphragme de champ**
Ajouter un verre de champ. Compter les cases.
- 5 Clarté** : mesure au luxmètre pour un objet étendu et ponctuel. Notice du luxmètre.
Garder une dizaine de minutes pour les parties II et III, qui se font vite.

II - Capteur numérique, résolution

On fabrique un appareil photo numérique avec un capteur CCD et une lentille. Montage à mettre en place en préparation et à ne plus toucher ensuite !

- 1 Image d'une bifente par une lentille** sur Caliens (lui même relié à un oscilloscope).
Faire une petite image, de l'ordre de la dizaine de pixels sur Caliens (lentille coté Caliens).
- 2 Limitation par la diffraction**
Mettre une fente derrière la lentille (coté Caliens, cf montage diffraction de Fraunhofer Sextant, on regarde bien à l'image géométrique de la source).
Fermer jusqu'à ce qu'on ne distingue plus les bifentes (prendre des bifentes assez larges pour qu'elles ne soient pas elles-mêmes source de diffraction). Changer l'écartement entre les bifentes pour à nouveau résoudre. Remonter au critère de Rayleigh (attention, la distance D est celle entre la fente et la barrette, et non pas entre la barrette et la lentille).

Transition : en fait, un objectif d'appareil photo est plus complexe. L'ouverture a notamment un rôle sur la luminosité et la profondeur de champ.

III - Objectif photographique

1 Relation entre ouverture N et éclairage

Utiliser un luxmètre. Faire l'image du diaphragme-dépoli, mettre le luxmètre pour qu'il soit entièrement éclairé : on s'intéresse à la luminosité par unité de surface.

2 Relation N et profondeur de champ

Montrer avec une grille inclinée, placée assez proche de l'objectif pour en faire une image grande. On peut tracer le nombre de cases nettes en fonction de N et montrer la linéarité (c'est approximatif, faire 3 points devant le jury pour voir, car ça dépend de comment est placé l'objectif).

Remarques

Divers

L'objectif photo est un système épais, avec plan principal image et objet.

Il y a le grandissement transversal et le grandissement angulaire.

Grossissement : rapport des angles sous lesquels est vu l'objet avec et sans appareil optique. Pour un système afocal, il se confond avec le grandissement angulaire. Pour un système non afocal, il dépend de la distance, et est alors défini avec la plus petite distance possible. Utilisé surtout pour une loupe.

Stigmatisme et aberrations

Deux points sont stigmatiques si tous les rayons passant par le premier passent par le second.

Relation des sinus d'Abbe : traduit le stigmatisme pour deux points B et B' situés hors de l'axe optique, dans le plan de A et A' par ailleurs stigmatiques. Lorsqu'elle est vérifiée, pas de coma et pas d'aberration de sphéricité (Houard, Taillet).

Conditions de Gauss : rayons paraxiaux (proches de l'axe optique, et petits angles). On a alors un stigmatisme approché. On a en fait $\sin i \sim i$.

Pour étudier les aberrations, on développe $\sin i$ à l'ordre 3. On a alors plusieurs catégories d'aberrations géométriques. Les paramètres du développement limité sont $h \ll 1$ (h est la hauteur d'impact sur la lentille) et $y \ll 1$ (y est la hauteur de l'objet par rapport à l'axe optique) (Houard).

- L'aberration de sphéricité. h^3 . Présente même pour un objet sur l'axe. Les rayons passant par un point loin de l'axe optique ne convergent pas au même point que les rayons paraxiaux.
- La coma. yh^2 . Similaire à l'aberration de sphéricité, mais pour des objets en dehors de l'axe optique. Les systèmes vérifiant la relation des sinus d'Abbe n'y sont pas sujet. Un système corrigé de la coma et de l'aberration de sphéricité est dit aplanétique.
- Courbure de champ et astigmatisme. y^2h . Apparaît pour des objets encore plus éloignés de l'axe optique (car en y^2).
- Distorsion. y^3 . Présente même si l'on diaphragme énormément (pas de dépendance en h), mais pour des rayons très inclinés. Distorsion en barillet et en coussinet.

Sources lumineuses

Quartz-iode

Filament au tungstène (W), vapeur d'iode pour régénérer le filament qui s'évapore. $T = 3100$ K,

donc beaucoup dans l'infrarouge. Quartz : c'est l'ampoule, à cause de T élevé. C'est aussi le principe des lampes halogène du commerce (voir La physique par les objets du quotidien).

Lampe spectrale

Basse pression (1 bar) : peu lumineux mais très cohérent ; haute pression : lumineux et peu cohérent.

L'amorçage se fait avec une tension $\propto P$, donc une fois la lampe chaude, P est grand, et on ne peut plus la réamorcer.

Attention, la lampe au mercure émet dans l'UV et est dangereuse pour les yeux. C'est moins grave pour celle au sodium.

Mécanisme d'émission : On impose une ddp entre les électrodes jusqu'à ioniser le gaz (qui en fait n'est pas le gaz de sodium ou de mercure, mais par exemple un gaz de néon, qui est là pour servir d'amorçage, et ensuite pour fournir des collisions et donc des excitations au gaz de sodium ou mercure). Lorsque l'ionisation a lieu, les électrons arrachés se dirigent vers les électrodes, et en chemin collisionnent avec des atomes, ce qui en ionise encore plus (et leur transfère de l'énergie cinétique, donc les chauffe). On atteint un régime permanent avec un gaz de néon chaud, une vapeur de sodium ou de mercure chaude, des électrons libres (surtout ceux du néon) qui tapent tous les atomes, et des atomes excités qui rayonnent. On maintient cet état par une tension alternative aux électrodes, et un voltage plus bas que pour l'amorçage (c'est auto-entretenu par les électrons libres). Voir le vieux livre "sources lumineuses" pour des précisions. Dans le cas de molécules (H_2 ou D_2 par exemple), on a aussi des réactions de type $D_2 \rightarrow D + D + \text{photon}$, et le spectre est alors continu (ce sont ces ampoules qui sont utilisées dans les spectrophotomètres par exemple) (cf épreuve B 2013).

Laser

He-Ne : c'est la transition du néon à 632.8 nm (rouge) qui émet, He est là pour inverser la population (on pompe sur He). Cohérence temporelle : $\Delta\lambda \sim 10^{-3}$ nm, soit $\Delta\nu \sim 1$ GHz, pour les modes sélectionnés par la cavité (2 ou 3). Il existe des lasers monomodes. Cohérence spatiale : presque sur toute la section du faisceau³. Le faisceau est gaussien et cohérent, avec environ 2 m avant d'avoir divergence et écart à l'onde plane (mais ça dépend de la longueur de la cavité).

Diode laser

Inversion de population dans une diode électroluminescente. Cohérence temporelle et focalisation bien moins bonne que pour un laser.

Il s'agit donc d'une jonction PN polarisée en directe. Les électrons arrivant côté N se recombinent pour traverser la jonction, et ce faisant émettent de la lumière. Cette lumière peut ensuite stimuler d'autres recombinaisons (pour améliorer ceci, il y a des miroirs semi-réfléchissants ou réfléchissants qui encadrent la jonction).

Tube fluorescent

Pas de néon, mais du mercure gazeux qui éclaire une couche fluorescente à la périphérie, qui réémet un spectre quasiment continu (plus les raies du mercure).

Formation d'image

Choix d'une lentille de projection :

— $4f' \leq D$.

- Pour une position d'objet et d'écran donnée, il y a deux solutions à l'équation de conjugaison. Une proche de l'objet, une proche de l'écran.

3. D'où le speckle, cf Duffait, §3.4 : il s'agit d'interférence sur les cellules de la rétine recevant de la lumière de points de l'écran qui sont proches.

- Grandissement $\gamma = OA'/OA$, donc plus grand si f' petit (permet d'avoir OA petit).
- Plus plat plus près, et utiliser des doublets achromatiques.

MP 8 – Interférences lumineuses

Plan

Bibliographie : Duffait, Sextant.

Introduction

Laser (faisceau élargi) + fente : diffraction. Mettre une bifente : interférences au sein de la figure de diffraction. (Ça décrit la manip qu'on va faire juste après.)

But : décrire des dispositifs interférentiels, en mettant l'accent sur les conditions d'obtention (cohérence spatiale et temporelle); puis en III montrer une application de l'interférométrie.

I - Dispositif à division du front d'onde

On étudie les fentes d'Young.

1 Cohérence temporelle

D'abord en lumière blanche. On remplace le laser par QI+fente source fine. Bifente assez petite : on voit les interférences en lumière blanche. Ce n'est pas très net, en fait toutes les figures d'interférences se superposent. On va le montrer avec des filtres.

Puis filtre interférentiel. Mesure de l'interfrange avec Caliens en fonction de λ . Tracer $i(\lambda)$ et remonter à a .

Rq : la luminosité est faible. Utiliser le tube en carton tenu par un gros diaphragme, coller les bifentes à la fente source (elles doivent capter toute la lumière diffractée par la fente source), faire converger au mieux la QI, montage compact.

2 Cohérence spatiale

Élargir la fente source et constater la diminution de contraste. Définir et mesurer l'angle de cohérence de la source pour lequel le contraste s'annule (sur Caliens). Mesurer et comparer à la théorie.

Transition : intérêt des dispositifs à division d'amplitude pour travailler avec des sources larges.

II - Dispositif à division d'amplitude

Rester en coin d'air.

1 Cohérence spatiale et localisation

On peut travailler en source étendue, mais les franges sont localisées : à l'infini ou sur les miroirs. L'illustrer en coin d'air seulement (car on s'en sert après). Avec diaphragme pour illustrer.

2 Cohérence temporelle : lumière blanche, trouver le contact optique. On a interférence uniquement pour des différences de marche très faibles.

Transition : on peut s'en servir pour des mesures de précision.

III - Application des interférences

1 Mesure d'épaisseur d'une lame de verre grâce aux cannelures

Voir montage Mesure de longueurs (SpidHR sur la frange centrale, intercaler la lame : on a les cannelures. Mesure.).

2 Mesure de la séparation du doublet du sodium

(Attention, ce sont des battements, ça n'illustre donc pas vraiment la cohérence temporelle).

Remarques

Utiliser les nouvelles bifentes, les filtres interférentiels neufs, et la fente réglable au micromètre près.

Filtre interférentiel : largeur ~ 10 nm, face réfléchissante vers la source, les nouveaux noirs sont mieux.

Couleur de la frange centrale (noire ou blanche) : explication usuelle. En vrai c'est plus compliqué, les séparatrices sont fabriquées avec des couches de diélectriques à la couche atomique près, ce qui implique un excellent contrôle du déphasage, et les fabricants font comme ils veulent.

Si étude de l'influence de la polarisation : tester un dispositif plus simple que le Michelson (pas évident car les réflexions sur des miroirs par exemple changent la polarisation, d'ailleurs, que se passe-t-il au niveau de la polarisation lors du passage de la séparatrice ?).

MP 9 – Diffraction des ondes lumineuses

Plan

Bibliographie :

- Duffait, Sextant
- Hecht : théorie derrière les anneaux de Fresnel.
- Sanz Tout en un et Cap prépa PC : goniomètre.

Introduction

Fermer une fente sur un faisceau laser : limites de l'optique géométrique lorsque variation de l'amplitude sur des distances de l'ordre de λ .

Messages : caractère ondulatoire de la lumière ; limite de Fraunhofer ; lien avec la transformée de Fourier.

I - Diffraction de Fresnel

1 Zones de Fresnel (Duffait pour la manip, Hecht Optique pour comprendre).

Le k de Duffait est le nombre de Fresnel : $k = \rho^2/\lambda \times (1/a + 1/b)$.

2 De Fresnel à Fraunhofer (Sextant)

Reprendre le montage précédent et déplacer la lentille de projection/prendre un trou petit/...

Rq : Une fois les mesures de Fresnel prises, ne pas retoucher au montage.

II - Diffraction dans les conditions de Fraunhofer

Pour toute cette partie : faire un montage rigoureux ($4f$), ou alors semi-rigoureux : les deux marchent. On est bien réglé quand la figure est invariante par translation de la fente (ce qui n'est pas le cas si on ne met pas de lentille de projection).

1 Illustrer les propriétés (translation et dilatation de la fente).

2 Profil de diffraction pour une fente

Justifier que le nombre de Fresnel est petit, acquérir le faisceau sous Caliens, et montrer que les propriétés de la figure sont correctes : abscisses des annulations, et ratio des amplitudes des maxima. Bien soustraire le fond lumineux.

3 Largeur de la tache de diffraction

Droite d'étalonnage à partir d'une fente réglable. Tracer la droite et remonter à f' de la lentille de projection. (discussion des incertitudes, + bien justifier qu'on est en Fraunhofer + on enchaîne sur la manip précédente avec Caliens).

Ou alors : influence de λ sur la largeur.

III - Réseaux

Cap Prépa PC ou Sanz PC.

Réseau sur un goniomètre, éclairage avec une lampe Hg (attention, lumière UV dans l'ordre 0, ne pas le regarder longtemps).

On vérifie la formule des réseaux : tracé de D_m en fonction de λ (on suppose λ connu). Faire un

fit avec un paramètre libre, et en déduire le pas du réseau.

(Rq : on suppose ici connues les propriétés des raies, qu'on utilise pour caractériser les réseaux, l'inverse du montage de spectrométrie).

Rq : Au minimum de déviation, on a $\theta_p = -\theta_0$, donc $D_m = \theta_p - \theta_0 = 2\theta_p = -2\theta_0$, et la formule des réseaux devient $\sin D_m/2 - \sin(-D_m/2) = p\lambda/a$.

On utilise le goniomètre réglable. Suivre le protocole du Cap Prépa. Prendre un réseau assez réfléchissant (bien le choisir dans le classeur) pour voir le reflet du réticule quand la lampe de l'oculaire est en place.

Résolution de l'appareil : largeur de la fente source (dont on voit l'image géométrique), résolution intrinsèque du réseau (largeur des ordres finie et en $1/N_{\text{fentes éclairées}}$), résolution du capteur ou du goniomètre. Tout ceci fixe une largeur finie associée à une raie. Il faut ensuite voir si deux raies se chevauchent ou pas : la séparation angulaire Δi pour un $\Delta\lambda$ donné est établie en différenciant la formule des réseaux. Comme les raies sont mieux séparées dans un ordre élevé ($\sin\theta = p\lambda/a$), on a une meilleure résolution à p grand. Voir Sanz PC.

Conclusion et ouverture

Parler de la diffraction de rayons X qui permet d'étudier les structures cristallines, et de diffraction d'onde de matière.

Remarques

Fresnel : il y a une diapo-trou nouvelle (comme celle des lycopodes).

On peut aussi faire le critère de Rayleigh.

On peut aussi faire du filtrage : Expérience d'Abbe. Mettre une lame semi-réfléchissante pour projeter le plan de Fourier, via un miroir, à côté de l'image de la grille. Peut aussi se faire en lumière blanche (ce qui change du laser).

MP 10 – Spectroscopie optique

Plan

Bibliographie :

- Duffait, Sextant.
- Sanz Tout en un et Cap prépa PC : goniomètre. (Anciens programmes.)

Introduction

Message : illustrer la puissance de l'utilisation des interférences. À chaque fois, discuter les limitations en résolution.

I - Spectromètre à réseau

Taillet dictionnaire : Spectromètre = fente d'entrée, élément dispersif, fente de sortie (les pixels sur Ocean Optics).

1 Goniomètre : réseau sur un goniomètre, éclairage avec une lampe Hg.

Voir rqs montage diffraction. Ici, on mesure de façon absolue (sans étalonnage) des longueurs d'onde.

Tracer $\lambda_{\text{mesuré}}$ en fonction de $\lambda_{\text{tabulé}}$ (si ça marche mal, mettre en cause le pas du réseau).

Résolution : largeur de la fente source (dont on voit l'image géométrique), résolution intrinsèque du réseau (largeur des ordres finie et en $1/N_{\text{fentes éclairées}}$), résolution du capteur ou du goniomètre.

Tout ceci fixe une largeur finie associée à une raie. Il faut ensuite voir si deux raies se chevauchent ou pas : la séparation angulaire Δi pour un $\Delta \lambda$ donné est établie en différenciant la formule des réseaux. Comme les raies sont mieux séparées dans un ordre élevé ($\sin \theta = p\lambda/a$), on a une meilleure résolution à p grand. Voir Sanz PC.

2 Principe d'un spectromètre commercial, mesure de la position de la raie jaune du sodium (Sextant).

Montage avec projection sur un écran. Ici, étalonnage préalable par une lampe spectrale dont on connaît les raies car on vient de les mesurer au goniomètre (mercure). Peu importe alors la position exacte, l'alignement, l'incidence normale ou non, etc... La droite d'étalonnage doit être une droite, sinon c'est qu'on sort de l'hypothèse des angles petits (on a linéarisé le sinus).

Bien montrer l'influence de la largeur de la fente d'entrée sur la résolution (les raies ont une largeur égale à l'image géométrique) : on voudrait la fermer, mais ça réduit la luminosité, et ultimement la diffraction intervient.

Puis application avec le sodium : remonter à λ .

On peut ensuite changer le pas du réseau et discuter de l'influence.

Faire le parallèle avec un spectromètre commercial : capteur CCD à la place de l'écran, qu'il faut étalonner, réseau par réflexion au lieu de transmission, ...

3 Spectre de l'hydrogène, mesure de la constante de Rydberg

Dire que le spectromètre commercial fonctionne pareil, mais avec des miroirs et un capteur CCD.

Utiliser Ocean Optique HR2000 (380-810nm), calibrer à l'aide des chiffres de la notice.

Transition : on se rend compte que cette raie du sodium est en fait un doublet. On va mesurer cet écart. Avec un dispositif interférométrique, plus sensible.

II - Spectroscopie interférentielle

1 Mesure de l'écart du doublet du sodium

Discuter de la limite de résolution : il faut translater les miroirs d'une distance $\propto 1/\Delta\lambda$, et il faut donc un dispositif capable de le faire !

On améliore la précision en prenant plus d'annulations : ceci nécessite aussi un dispositif permettant de beaucoup charioter (on divise l'incertitude par le nombre N de battements).

Si on ne fait pas la largeur de raie après, dire qu'en vrai on peut translater le miroir avec un moteur, enregistrer l'éclairement au centre, et on obtient la TF de la densité spectrale de la source.

Transition : la baisse progressive de contraste est due à la largeur finie des raies. On va mesurer la largeur d'une raie.

2 Mesure de la largeur d'une raie (en fait non, préférer la cavité Fabry-Perot).

Mesurer le chariotage d entre contact optique et contraste divisé par deux. La ddm entre les deux moments où le contraste est divisé par deux est $4d$. Pour $2d = 4\text{ mm}$, on a $\Delta\lambda \sim 0.1\text{ nm}$. C'est normal pour une lampe spectrale haute pression. (Pour une basse pression, c'est dix fois moins.)

III - Cavité confocale Fabry-Perot

Uniquement si temps (probablement pas).

Conclusion

Astrophysique, spectroscopie UV-visible en chimie, ...

MP 11 – Émission, absorption de la lumière

Plan

Bibliographie :

- Duffait et Sextant.
- Mesplède, chimie générale et analytique : Beer-Lambert.

I- Émission spontanée

- Montrer au PVD la lampe à hydrogène.
- **Constante de Rydberg** (avec la lampe spectrale à hydrogène, voir un autre montage...)

II - Absorption

1 Absorption d'une vapeur de sodium

Prendre l'ampoule prévue pour la résonance du sodium.

Montage spectromètre avec un réseau (Sextant) : d'abord montrer le spectre d'une lampe au sodium (la raie jaune). Enlever la lampe. Prendre l'ampoule au sodium, la faire chauffer pour que du gaz de sodium soit présent dans l'ampoule, l'éclairer avec une QI, et montrer qu'il y a une raie d'absorption dans la lumière transmise, au même endroit que là où était la raie d'émission de la lampe au sodium.

2 Loi de Beer-Lambert (Mesplède, chimie générale et analytique).

Avec SpidHR (Ulysse) et le module fait pour mettre la cuve. Mesure pour différentes concentrations, remonter au coefficient d'extinction molaire. On peut comparer à la valeur déduite des résultats de Mesplède.

Vérifier que le spectre sur le coté est le complémentaire de celui absorbé.

Transition : lorsque émission et absorption sont "équilibrés", le rayonnement peut se thermaliser et on obtient un spectre de Planck. Étude dans le cas d'un corps noir (rappel : c'est un absorbeur intégral, donc le rayonnement qu'il émet a beaucoup interagit avant de sortir).

III - Rayonnement de corps noir

La lampe et la loi de Stefan.

Ampoule halogène + le pyromètre. On monte à 8 A dans l'ampoule (au delà, les pinces crocodiles pour tenir l'ampoule fument).

Tracer $\log T$ (mesuré au pyromètre) en fonction de $\log UI$ (mesurés au voltmètre/ampèremètre) : pente. Puis P en fonction de T^4 .

Rq : on fait des mesures sur moins d'une décade, donc être prudent en affirmant que c'est une loi de puissance (dans un article scientifique, ça ne vaudrait rien...). De plus, être prudent sur le discours. Ici, on vérifie que notre ampoule suit la loi de Stefan. (On ne peut pas supposer que l'ampoule est un corps noir et vérifier la loi de Stefan, car le pyromètre utilise la loi de Planck...). Le pyromètre, en mode deux couleurs, mesure la puissance dans deux longueurs d'onde dans l'IR, et fait le rapport. En supposant qu'il s'agit d'un spectre de Planck, il en déduit T . Donc retrouver Wien est compatible avec le fait que l'ampoule émet comme un corps noir.

Alternative à cet manip : On peut prendre une QI sur laquelle l'intensité est réglable, et en faire le spectre à l'aide d'un prisme, projeté sur un écran. Lorsque l'on diminue l'intensité de

la QI, et donc la température du filament, on constate sur le spectre que les premières couleurs qui disparaissent sont le violet, puis le bleu, puis le vert, etc. C'est donc une illustration rapide et qualitative de la loi de Wien (qui je pense vaut mieux que la manip ci-dessus de la loi de Stefan qui est en fait aussi qualitative et très difficilement défendable...).

IV - Fluorescence, transitions non-radiatives

Sextant.

Diluer la rhodamine dans l'éthanol (et pas le méthanol). Diluer suffisamment pour que le laser vert passe à travers la cuve en longueur.

Spectre d'absorption éclairé par QI. Faire un blanc avec juste de l'éthanol (il y a un mode absorption dans le logiciel). Absorption à 330 nm.

Spectre sur le coté, éclairé par le laser à 532 nm (proche de la transition). Le pic de réémission est alors à 550 nm.

Autres

Le laser transparent : ouverture sur l'émission stimulée (mais attention : et la cavité et l'émission stimulée sont importants : on ne discute pas vraiment le processus d'émission seul...).

Conclusion et ouverture

Ouverture sur la spectroscopie IR qui utilise l'absorption d'une onde évanescente à l'interface prisme/échantillon.

Remarques

Loi du BUP 827 : ne pas utiliser. Utilise la loi de Stefan, et de plus, on n'a pas d'ampoule à filament de tungstène, et le jury ne sera pas dupe. Plus le point de fonctionnement utilisé qui dépend de l'ampoule...

Différence entre absorption et diffusion d'un point de vue fondamental

Absorption : le photon est absorbé par l'électron, il est détruit. Ceci n'est possible que si l'électron est dans le champ de quelque chose (les processus à deux particules sont impossibles du point de vue de la conservation de l'énergie et de l'impulsion, voir p.), par exemple au sein d'un noyau, ou dans un champ externe pour un électron libre. Dans le cas d'un processus lié (où l'électron reste dans l'atome ou la molécule), on peut avoir : passage de l'électron vers un niveau supérieur (atome ou molécule); excitation d'un niveau vibrationnel ou rotationnel (molécule) (comme dans les spectres IR en chimie).

Diffusion : interaction photon + électron \rightarrow photon + électron. Par exemple la diffusion Compton, ou la diffusion Rayleigh par un atome. Pour un électron libre (effet Compton), le spectre est continu, même du point de vue quantique (à moins que l'on ne quantifie la quantité de mouvement de l'électron, mais les niveaux seraient continus pour toute application raisonnable). Pour un atome, la diffusion Rayleigh donne un spectre continu également. Et ça reste vrai du point de vue quantique, tant que la longueur d'onde incidente reste loin d'un niveau électronique de l'atome.

Ce dernier point est important : la diffusion Rayleigh n'excite pas de transition électronique. Ce n'est donc pas une absorption puis réémission ! Si c'était le cas : (i) le spectre de Rayleigh serait grossièrement non continu ; (ii) la dépendance angulaire de la diffusion serait isotrope (car l'émission spontanée est isotrope). Ni (i), ni (ii) ne sont vrais. (Pour (ii), on se souvient que le rayonnement est dipolaire.)

Il est vrai que le résultat macroscopique d'une absorption, excitation de l'électron, puis désexcitation résultant en une émission spontanée, est analogue à de la diffusion. Mais comme on vient de le voir, ce n'en est pas. Lors de la diffusion Rayleigh, le nuage électronique interagit avec l'onde incidente, il est déformé et agit comme un dipôle, rayonnant ainsi de l'énergie de l'onde incidente dans toutes les directions. Mais l'électron ne change pas de niveau d'énergie. Ceci n'empêche pas cette diffusion d'être plus ou moins efficace selon la longueur d'onde. (Le modèle de diffusion s'obtient d'ailleurs dans le modèle quantique par une approche perturbative et dans le cas de fréquences éloignées des transitions électroniques).

Autre note : la diffusion (ou l'absorption / réémission) même sans changement d'énergie du photon, résultent en une atténuation du faisceau le long de la direction de propagation car le faisceau incident est dévié sur les cotés.

MP 12 – Photorécepteurs

Plan

Bibliographie :

- Sextant et Duffait.
- Bellier, Physique expérimentale.
- Notice de Caliens.

Introduction

Photorécepteur thermique VS photonique.

Comment choisir au mieux le photorécepteur adapté, ainsi que son montage électrique associé ?

I- Caractéristiques, linéarité, sensibilité

Éclairement : QI et polariseurs.

1 Photodiode : caractéristique, choix du point de polarisation, linéarité.

Tracer la caractéristique (avec Latis Pro car il faut du différentiel) (ne pas mesurer la tension directement sur la photodiode, car son impédance est grande, et celle de la carte d'acquisition pas tant que ça : faire par différence entre deux autres tensions).

Puis discussion : justifier le choix de U_{alim} : le plus grand possible pour que la mesure varie sur une plage grande ;

justifier le choix de R : on veut que la droite $U = U_{\text{alim}} - RI$ en $U = 0$ passe par dessus la caractéristique de la diode à éclairement maximal.

2 Photorésistance : caractéristique, linéarité. Suivre Duffait (montage avec source et résistance).

Utiliser Latis Pro car il faut une mesure différentielle.

1- Tracer la caractéristique $U(I)$: c'est une résistance.

2- Tracer la caractéristique $R(\text{éclairement})$ en mesurant au ohmmètre.

Définir sensibilité dans le cas linéaire (sortie/entrée), mesure. Résolution = plus petite variation d'entrée détectable.

Bilan : la photorésistance n'est pas linéaire, on a $S(\lambda, \Phi)$. La photodiode est linéaire, on a $S(\lambda, \Phi) = R_\lambda \Phi$.

II- Réponse spectrale

Mentionner aussi la réponse spectrale des autres éléments du montage (polariseurs par ex.).

1. Photodiode : on trace $R_\lambda = S(\lambda, \Phi)/\Phi$, avec des filtres interférentiels, et en mesurant Φ à l'aide du puissancemètre commercial Thorlab (qui est en fait une photodiode étalonnée).
2. Photorésistance : non linéaire, donc $S(\lambda, \Phi)$ n'est pas factorisable et il faudrait faire tous les couples (λ, Φ) : on ne fait rien.

III- Temps de réponse

1. Photodiode VS photorésistance avec le même stroboscope.
Les faire ensemble, on peut conclure sur la photorésistance seulement.

Montrer que le temps de réponse diminue si on diminue la luminosité.

Pour la photorésistance, on utilise le montage à AO qui impose une tension constante.

C'est bien la réponse de tout le circuit que l'on caractérise.

IV - Détecteur avec résolution spatiale : barrette CCD

Caliens : acquisition sur l'oscilloscope (il faut parfois le brancher en même temps sur l'ordinateur pour que ça marche). Notice de Caliens.

1 Montrer les pixels sur l'oscilloscope.

2 Lien entre sensibilité et temps de charge des photosites

Sur l'oscilloscope, on visualise un temps où rien ne se passe : c'est le temps de charge des photosites. Ensuite vient la décharge des sites un à un : c'est l'affichage du signal. (Puis il y a un second signal affiché, mystérieux...)

Tracer le temps de charge en fonction de la sensibilité. On retrouve bien la pente de la relation de la notice (2.5 ms par cran de sensibilité).

3 Lien entre tension et temps de charge

Éclairer faiblement Caliens avec une QI. Varier la sensibilité et mesurer l'amplitude max du signal. Tracer cette amplitude en fonction du temps de charge : c'est bien linéaire (si on n'atteint pas la saturation).

4 Linéarité

Jusque là on était à luminosité fixe. On peut montrer que la tension est bien proportionnelle à l'intensité.

On peut aussi faire l'image d'une bifente et faire comme avec instruments d'optique.

Remarques

À l'oral

J'ai eu ce montage le jour de l'oral. Je n'ai eu le temps que de préparer le I et le II pendant les 4 heures de préparation : il ne faut pas être trop ambitieux ! Mon exposé oral s'est arrêté au bout de 35 minutes, faute de choses à dire... J'ai tout de même eu 17/20, grâce à de bonnes explications du fonctionnement de la photodiode et photorésistance, et surtout grâce à un exposé pédagogique insistant sur la recherche de la grandeur photosensible, du point de polarisation optimal, etc...

Autres

Attention : la réponse spectrale de la photodiode n'est pas plate, donc sa sensibilité dépend du spectre de la source. Cette mesure a donc un sens uniquement pour une source.

Intérêt de la mesure de la caractéristique électrique : identifier les grandeurs photosensibles.

Le puissancemètre est une photodiode étalonnée : on s'en sert ici pour mesurer la caractéristique d'une photodiode... Avoir à l'esprit que ça a un sens car il y a des moyens "absolus" d'étalonner une diode : avec une thermopile par exemple (ce qui a sûrement été fait pour le puissancemètre, mais est fastidieux et trop long pour être fait en montage).

Source d'intensité variable : loi de Malus et polariseur (et pas filtre de densité, peu précis).

MP 13 – Biréfringence, pouvoir rotatoire

Plan

Bibliographie :

- Sextant et Duffait.
- Taillet, Handbook.
- Houard : manip de la biréfringence du scotch.
- Bruhat Optique : le mica est un milieu biaxe, détails sur le pouvoir rotatoire.
- Sanz Tout en un PC : rappels sur les lames quart et demi onde, sur la polarisation.

Introduction

Le titre contient les noms de deux grandeurs caractéristiques d'un milieu :

- Biréfringence : grandeur caractérisant un milieu biréfringent, c'est une différence d'indice.
- Pouvoir rotatoire : grandeur caractérisant un milieu anisotrope exhibant une activité optique (ou polarisation rotatoire), c'est un angle par unité de longueur.

I - Biréfringence

1 Mise en évidence avec un prisme de spath (Duffait). Montrer les polarisations.

2 lame de quartz épaisse : cannelures.

Lame de quartz de 4 mm ou de 1.5 mm. Remonter à e ou Δn , au choix.

On peut reporter les σ d'une dizaine de minima et faire une droite.

Rq : ça ne marche en fait pas très bien, on n'arrive pas à obtenir ce qui est indiqué sur la lame.

Il paraît que si on est précis, on se rend compte que la loi ne colle pas car la biréfringence dépend de la longueur d'onde, et il faudrait faire un fit avec un sinus glissant... Cela dit, la biréfringence dépend assez peu de la longueur d'onde.

3 lame mince : compensateur de Babinet (Duffait).

Prendre la lame de mica 65 nm. D'abord étalonner le compensateur de Babinet avec un filtre. Ensuite remonter à δ .

Pour cette lame, il s'agit d'un ordre 0 ($\delta < \lambda$), et il n'y a pas de longueurs d'ondes éteintes dans le visible. Les interférences en lumière blanche donnent un gris (on peut vérifier).

Puis : confirmer la valeur trouvée avec la méthode de la lame quart d'onde (Duffait) (cf leçon polarisation). On trouve pareil.

4 Scotch (si temps), on peut faire une échelle de teinte (Houard).

II- Pouvoir rotatoire

Le pouvoir rotatoire nécessite un milieu chiral. Il est indépendant de la biréfringence (le saccharose et le spath sont l'un (biréfringent) et pas l'autre, le quartz est les deux). On peut imaginer faire l'expérience dans un miroir : si la lumière a tourné, dans l'expérience du miroir elle aura tourné d'un angle opposé, et c'est donc que l'image du milieu (de ses constituants) dans le miroir est différente de lui-même : il est chiral (\equiv non superposable à son image dans un miroir). Dans un cristal tel que le quartz, il y a effectivement des enchaînement en hélice d'atomes, toutes dans le même sens. Le pouvoir rotatoire se modélise comme $\mathbf{P} \propto \nabla \wedge \mathbf{E}$ (Bruhat).

1 Mise en évidence : avec une lame de quartz. Montrer que tourner la lame ne change rien, contrairement au cas de la biréfringence.

2 Mesure du pouvoir rotatoire du quartz et de la dispersion rotatoire (Duffait p. 170).

Tracer α en fonction de $1/\lambda^2$. Comparer à la valeur tabulée du Sextant (ça ne marche pas très bien, l'épaisseur de la lame n'est pas bonne).

On peut aussi le faire pour une lame épaisse en enregistrant le spectre cannelé à l'ordinateur.

3 Effet Faraday

Étalonner l'électroaimant, pièces tronconiques creuses. Si la constante de Verdet mesurée n'est pas bonne, montrer juste la droite. La constante est dans Sextant. Application à la modulation d'intensité lumineuse.

Conclusion

Applications : lames $\lambda/4$ et autres, biprisme Soleil, modulateur optique pour Faraday, séparateurs de faisceaux, lecteurs CD (prisme de Wollaston).

Applications : géologie, chimie (distinction des énantiomères, vitale pour certains médicaments). Effet Faraday en astrophysique dans les plasmas.

Remarques

Théorie de la biréfringence

Voir Duffait.

Les lois de Descartes ne s'appliquent que si la surface des indices dans le plan d'incidence est un cercle. C'est le cas pour le rayon ordinaire, mais en général pas pour le rayon extraordinaire.

La construction de Descartes (surface des indices) donne la direction de \mathbf{k} , celle de Huygens (surface des vitesses) donne celle de $\mathbf{\Pi}$ (donc du rayon lumineux).

L'ellipsoïde des indices donne les directions de \mathbf{D} .

Applications

Lame quart d'onde : possède des lignes neutres, avec des indices n_o et n_2 , et telle que $(n_2 - n_o)e = \lambda/4$ pour un λ donné. Le déphasage entre les deux lignes est donc $\pi/2$. Si on envoie une rectiligne à 45 degrés des lignes neutres, on a en sortie une circulaire (droite ou gauche selon le quadrant dans lequel on est en entrée). Si on envoie une rectiligne avec un angle quelconque, on a en sortie une ellipsoïdale dont les axes sont selon les lignes neutres.

Lame demi-onde : idem, mais $(n_2 - n_o)e = \lambda/2$, d'où un déphasage de π .

Ces lames sont symétriques : on peut les retourner sans rien changer.

MP 14 – Polarisation des ondes électromagnétiques

Plan

Bibliographie :

- Sextant et Duffait.
- Bruhat Optique : le mica est un milieu biaxe, détails sur le pouvoir rotatoire.
- Sanz Tout en un PC : rappels sur les lames quart et demi onde, sur la polarisation.

Introduction

La polarisation ne s'explique pas avec une théorie scalaire.

Projeter l'organigramme de Duffait pour la détermination de la polarisation. Faire l'analyse de la QI : ce n'est pas polarisé.

I - Polarisation rectiligne

- 1 **Loi de Malus** avec des polariseurs dichroïques.
- 2 **Banc hyperfréquence et polariseur avec lames métalliques**
Juste montrer. Voir remarques pour l'interprétation.

II - Polarisation par réflexion/transmission sur un diélectrique

Éclairage d'une lame de verre :

- 1 Analyse : rectiligne partielle (avec $\lambda/4$ et polariseurs).
- 2 Mesure de l'angle de Brewster (plaquette tournante graduée, horizontalité au niveau à bulle, repérer la normale en faisant effleurer le faisceau laser, ...). Remonter à n .
- 3 Tracé du taux de polarisation en fonction de N (nombre de lames) (Sextant).
Mesure avec photodiode commerciale.
Attention : il faut avoir en entrée une source polarisée stable et puissante. Prendre un laser à DIODE (avec une QI il faut faire converger avec une lentille, et ça peut changer les polarisations : mal ; d'autre part, les lasers He-Ne non polarisés ont une polarisation qui fluctue).
Bien vérifier que sans lame, on a des polarisations d'égale intensité en verticale et horizontale ; mesurer l'éclairement.
Utiliser les grosses plaques de verres sur le support en bois.

Application dans les lasers polarisés : il y a une lame sous incidence de Brewster dans la cavité, qui fait qu'on ne garde qu'une seule composante.

III - Polarisation par une lame cristalline

Prendre la lame de mica 65 nm. D'abord étalonner le compensateur de Babinet avec un filtre. Ensuite remonter à δ .

Pour cette lame, il s'agit d'un ordre 0 ($\delta < \lambda$), et il n'y a pas de longueurs d'ondes éteintes dans le visible. Les interférences en lumière blanche donnent un gris (on peut vérifier).

Puis : confirmer la valeur trouvée avec la méthode de la lame quart d'onde (Duffait) (cf leçon biréfringence). On trouve pareil.

IV - Cinéma 3D

Produire une circulaire avec un polariseur et une $\lambda/4$, l'envoyer sur un écran métallique. L'écran métallique renvoie la circulaire en la faisant changer de sens. Avec des lunettes de cinéma, on ne voit qu'à travers un des deux verres. Changer le sens de l'elliptique : c'est à travers l'autre verre qu'on voit.

Conclusion et ouverture

Lunettes : on peut faire une circulaire, et montrer que ça ne passe que dans un des deux verres.

Remarques

Application aux lunettes 3D

Le projecteur envoie deux images, une polarisée circulaire gauche, l'autre droit. Les verres des lunettes laissent passer l'une ou l'autre des polarisations circulaires (avec une décomposition selon les rectilignes, ça dépendrait de comment on tourne la tête). Chaque verre est donc constitué d'un quart d'onde qui transforme la circulaire en rectiligne, suivi d'un polariseur rectiligne (coté œil), l'axe du polariseur rectiligne étant à 45 degrés avec les axes de la $\lambda/4$, dans un quadrant ou dans l'autre selon l'œil droit ou gauche.

Techniques de polarisation

Dichroïsme : qualité d'absorber différemment selon la polarisation.

Polariseur Polaroid : chaînes de polymères étirés dans une direction, + colorants absorbant dans une large bande, avec liaison polymère-colorant dans la même direction. Coefficient de transmission en croisé : $1/4000$; et après un seul polariseur : 30%. Il y a absorption de l'énergie lumineuse (qui donc chauffe le polariseur).

C'est différent de l'expérience avec les ondes hyperfréquences, où le polariseur est une grille métallique qui réfléchit la polarisation parallèle à la grille (il n'y a donc pas d'absorption d'énergie).

- La polarisation parallèle à la grille est réfléchie car des courants peuvent être induits à la surface du métal et empêcher la propagation de l'onde (comme à la surface d'un bon conducteur). Pour que la réflexion ait lieu, il faut que la distance entre les barreaux soit petite devant la longueur d'onde⁴.
- En revanche, la polarisation perpendiculaire ne peut pas induire de courants, ceux-ci ne pouvant pas "boucler" plus loin⁵, et il faut qu'ils bouclent car on est à $\omega \ll 10^{14}$ Hz où l'électroneutralité est assurée. L'onde n'est donc pas réfléchie.

4. Cf. exercice 8.8 de Carpentier. Il y a en fait une pulsation de coupure au delà de laquelle ça passe, donc les longueurs d'ondes $\lambda < \lambda_c \sim 1/(\text{distance entre barreaux})$ passent, celles au-dessus non.

De plus, si la distance entre barreaux est grande devant la longueur d'onde, on est dans les conditions d'applicabilité du principe de Huygens-Fresnel, et on a de la diffraction comme avec un réseau (voir p. 162). En particulier, le résultat est indépendant de la polarisation de l'onde.

5. Attention à l'argument qui dit que les électrons ne peuvent pas se déplacer car ils sont bloqués par la grille : il faudrait pour cela que la distance parcourue par un électron durant une période de l'onde soit grande devant le diamètre d'un barreau ; peut-être que c'est vrai, peut-être pas (ça dépend de l'amplitude du champ)...

Il existe aussi des polariseurs circulaires, sensibles aux polarisations droite ou gauche.

Laser He-Ne et polarisation : soit non polarisé, soit polarisé rectilignement.

Cas non polarisé : si on place un polariseur, l'intensité fluctue, de l'ordre de 1s à 10s.

Cas polarisé : c'est réalisé en plaçant une lame de verre à l'angle de Brewster dans la cavité.

Diode laser et polarisation : généralement rectiligne (dans le plan de la jonction).

Interférence et polarisation

Une lumière non-polarisée s'écrit $[E_x(t)\mathbf{u}_x + E_y(t)\exp(i\phi(t))\mathbf{u}_y] \times \exp i(\omega t - kz)$ (Sextant p. 263), avec $E_x(t)$ et $E_y(t)$ des fonctions aléatoires réelles vérifiant $\langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle = I$ constante, et $\phi(t)$ le déphasage entre les deux composantes (aléatoire si la lumière n'est pas polarisée : le vecteur $\vec{E}(t)$ tourne alors aléatoirement ; mais si la polarisation est, par exemple, rectiligne : $\phi = 0$, ou circulaire : $\phi = \pm\pi/2$, etc...).

Si la lumière n'est pas polarisée, on ne peut pas faire interférer les composantes x et y ensemble en les projetant dans une direction commune (à 45° par exemple), car le terme d'interférences croisées est $E_{xm}E_{ym}\langle \cos \phi(t) \rangle$, et est donc nul. Plus physiquement, les trains d'onde ont un déphasage entre x et y qui varie tout le temps

Chapitre 8

Mécanique quantique

LP 35 – Absorption et émission de la lumière

Bibliographie :

- **Diu**, physique statistique : p. 906 pour les coefficients d'Einstein (plus clair que Dangoisse)
- **Dangoisse**, Lasers : pour toute la partie lasers.
- **Rouessac**, pour la fluorescence / phosphorescence, et **Valeur**, invitation à ...
- Taillet pour des définitions rapides (fluorescence, ...).
- C'est aussi au programme de PC, voir Sanz nouveau programme.

Manips :

- Laser transparent : spectre de devant et de côté.
- Fluorescence sur une feuille de papier, avec le sodium et ses raies UV, ou bien à travers un filtre visible.

Niveau L3, pré-requis :

- Oscillations et rétroaction.
- Cavité Fabry-Pérot.

I - Processus d'interaction lumière-matière

Diu, Physique statistique.

1 Les différents processus d'interaction : absorption, émission stimulée, et spontanée.

2 Les relations d'Einstein

3 Importance relative stimulée/spontanée : OG lampe spectrale, dépendance en λ .

II - Application au laser

Dangoisse, Lasers.

On présente ici une application TRÈS importante qui exploite cette physique.

1 Principe du laser

Analogie avec un oscillateur, facteur de qualité de la cavité.

Dispositifs de pompage : flash optique (lasers solides), décharge électrique (lasers à gaz), courant de porteurs (lasers à semi-conducteurs), ...

2 Laser à deux et trois niveaux

Montrer rapidement qu'à deux niveaux avec un pompage optique symétrique on a toujours $N_1 \geq N_2$.

Calcul à trois niveaux (selon temps).

3 Le rôle de la cavité

Rôle de la cavité : affine les raies (qui sinon sont larges, thermiquement par exemple), sélectionne un seul mode transverse (en coupant transversalement les autres), permet des aller-retours dans le milieu amplificateur et donc une grande amplification.

Plus fine si plus de réflexions, car alors les ondes non accordées à la cavité interfèrent destructivement d'autant plus. OG pour He-Ne.

La courbe de gain est aussi importante : seuls passent les modes de cavité qui sont suffisamment amplifiés pour passer le seuil.

S'il y a plusieurs transitions atomiques (qui sont excités par pompage), on peut mettre un filtre dans la cavité qui atténue ces autres fréquences. De plus, une fois le système excité dans une transition, les atomes sont tous "occupés" à effectuer cette transition et donc ne sont pas libres pour d'autres : l'amplitude seuil des autres transition est augmentée.

III - Fluorescence

Principe rapide, applications (voir Rouessac).

Conclusion et ouverture

Remarques

Spectromètre : "Quand on montre des spectres, prendre soin de régler le temps de pause, ou durée d'intégration, sur une période ou multiple de la période du secteur. Ceci permet de rejeter les oscillations liées aux 50 Hz redressé (100 Hz). Le spectre observé est alors stable à l'écran (ce qui n'était pas le cas dans la présentation)."

Diode laser

Voir Cagnac.

Il faut d'abord décrire le fonctionnement d'une diode électroluminescente (DEL) classique : il s'agit d'une jonction PN parcourue en direct par un courant (de P vers N). Les électrons arrivant en N se recombinent avec des trous (ils tombent dans la bande de valence), et ce faisant émettent de la lumière.

Dans une diode laser, le principe est le même, mais la recombinaison électron-trou est auto-stimulée. Pour permettre ceci, on confine les photons dans la jonction : réflexion en haut et en bas car indice optique plus faible, et faces métallisées.

Fluorescence et phosphorescence

Rouessac. Bruhat Optique pour plus d'informations. Voir aussi BUP 996 (historique, intro).

Fluorescence : A absorbe un photon $\rightarrow A^*$, et un électron passe du niveau électronique fondamental E_0 à E_1^0 au dessus, et en fait, à un sous niveau vibrationnel E_1^i du niveau électronique du dessus. Puis désexcitation non-radiative des niveaux vibrationnels vers E_1^0 , et enfin retour à E_0 . La fréquence d'absorption n'est donc pas la même que celle d'émission.

Phosphorescence : pareil, mais initialement on a un niveau E_0 peuplé $\downarrow\uparrow$, qui après absorption peuple le niveau E_1 avec \uparrow , qui se retourne, on a donc E_0 avec \downarrow et E_1 avec \downarrow , et la transition de 1 vers 0 est dite interdite de spin. Elle peut arriver (le spin se “retourne en vol”), mais avec une probabilité faible, ce qui nécessite donc un temps très long.

Pour résumer : fluorescence = désexcitation par transition entre deux états de même multiplicité, rapide ; phosphorescence = entre deux états de multiplicité différente, désexcitation lente.

Pourquoi toutes les molécules ne sont-elles pas fluorescentes ou phosphorescentes ? Il existe aussi des désexcitations entre les niveaux électroniques E_1 et E_0 qui sont non radiatives. Si celles-ci ont lieu plus souvent que les radiatives, il n’y a pas d’émission. Ainsi plus une molécule est rigide, moins elle a tendance à se désexciter de façon non-radiative, et plus facilement elle sera fluorescente. C’est le cas de certains cycles. Mais une molécule “molle” perdra la *totalité* de l’énergie absorbée par des désexcitation complètement non-radiative, i.e., par relaxation vibrationnelle ou par dégradation.

Émission spontanée

L’émission spontanée, dont l’existence expérimentale ne fait pas de doute car un atome se désexcite sans champ extérieur, ne se décrit correctement que dans le cadre de l’électrodynamique quantique avec quantification du champ électromagnétique.

Selon Aslangul, tome II page 941, son existence technique provient de la non commutation des opérateurs de champ. Et plus physiquement, il s’agit en quelque sorte d’une émission stimulée déclenchée par les fluctuations quantique du vide (le champ dans lequel baigne l’atome est le champ au niveau fondamental, qui n’est pas strictement d’énergie nulle). Pour les curieux qui auront du temps après l’agrégation, elle est décrite en détail dans son paragraphe 25.2.

C. Tannoudji, Interactions photons atomes, a également l’air intéressant (aussi pour les autres processus d’ailleurs).

Émission stimulée et absorption

L’émission stimulée se décrit conjointement avec l’absorption dans le cadre de la mécanique quantique sans champ quantifié (du moins pour certains de ses aspects). Un traitement possible est dans le cadre de la théorie des perturbations dépendantes du temps (voir par exemple le Basdevant de Mécanique Quantique, chapitre 17), la perturbation étant en $\exp(i\omega t)$ (l’onde incidente). Il n’y a absorption, ou rayonnement induit, que si cette perturbation est résonnante avec l’atome : donc si $\omega \simeq \omega_0$ où $\hbar\omega_0$ est la différence d’énergie entre les deux niveaux atomiques. C’est une façon de “comprendre” pourquoi le photon induit est de même fréquence que le photon incident. Cela n’explique toutefois pas pourquoi il est aussi de même polarisation et en phase...

Autres remarques hors sujet pour l’agrégation

C. Tannoudji, Interactions photons atomes, p.96 à propos des processus multiphotonique (comme l’émission stimulée) : “l’énergie globale de l’état final du système particules + rayonnement étant bien sur égale à celle de son état initial (que même que l’impulsion globale et le moment cinétique global)”.

On peut aussi consulter Bruhat (Optique) pour toute une zoologie de processus. Ainsi que pour un paragraphe assez concis sur l’élargissement des raies.

LP 36 – Aspect corpusculaire du rayonnement. Notion de photon

Plan

Bibliographie :

- **Salamito**, Tout en un PCSI 2013 : une bonne partie du plan.
- **Sanz** Tout en un PC ancien programme : moment cinétique et impulsion d'une onde OEM.
- Cap Prépa nouveau programme : complément du Salamito.
- Dangoisse, Lasers : refroidissement d'atomes.
- **Cagnac**, Physique atomique I (nouvelle édition) : description détaillée des expériences.
- **Langlois**, Relativité : effet Compton avec calculs malins.
- Aslangul pour compléments.

Niveau L2, pré-requis :

- Rayonnement du corps noir
- Ondes électromagnétiques dans le vide
- Relativité restreinte
- Effet Doppler

I - Vers la nécessité du photon

Suivre le Tout en Un 2013 première année.

1 Le rayonnement du corps noir

2 L'effet photoélectrique

Voir Cagnac pour une discussion détaillée. Schéma et courbes dans le Cap Prépa 2013.

Le courant n'apparaît que si $\nu > \nu_s$, indépendamment de l'intensité lumineuse \rightarrow bien expliqué si chaque électron n'absorbe qu'un seul photon, et que c'est suffisant ou non pour être extrait du métal : $h\nu > W_s = h\nu_s$.

On prédit de plus que l'énergie cinétique maximale des électrons extraits est $E_c = h\nu - W_s$, et qu'ils atteignent l'anode seulement si $E_c > eV$, d'où un V entre anode et cathode au seuil qui vaut $V = (h/e)(\nu - \nu_s)$. On mesure bien la pente h/e , avec le même h que pour le corps noir !

Attention, ce ne sont en fait pas des preuves incontestables de l'existence du photon, mais des indices forts qui, historiquement, ont mené à postuler l'existence du photon.

3 lame semi-réfléchissante en comptant les photons

Preuve moderne de la nature corpusculaire (Aspect et al., 1986).

Néanmoins, ce n'est pas si simple : la nature ondulatoire reste présente (cf interférence des fentes d'Young, cependant, on abordera cet aspect ondulatoire dans la prochaine leçon, où on introduira la fonction d'onde, amplitude de probabilité).

Photon postulé. Maintenant, quelles sont ces caractéristiques ? Il faut qu'elles soient compatibles avec l'électromagnétisme (parce que ça marche dans son domaine d'application).

Attention : pas de démonstrations rigoureuses ici, mais on montre que tout est cohérent avec l'électromagnétisme et la relativité.

II - Carte d'identité du photon

1 Énergie

On a vu (corps noir, effet photoélectrique) que $E = h\nu$.

2 Impulsion

Soit : avec la relation $E = pc$ pour l'énergie et l'impulsion cédés à une particule par une OPPH (Sanz ancien programme PC ou MP).

Ensuite on en déduit avec $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ que $m = 0$. C'est compatible avec le fait que leur vitesse est c .

Soit : on admet que $m = 0$ car déplacement à c , et donc on en déduit $E = pc$.

On parlera après de pression de radiation.

3 Moment cinétique (Sanz ancien programme, Cagnac)

Même calcul que pour l'impulsion, mais avec le moment cinétique (sans détailler).

Décrire ou non (selon le temps) l'expérience de Beth (compliqué car fait intervenir la biréfringence du milieu, et il y a déjà assez de calcul). En gros, on fait passer une circulaire droite dans une demi-onde, qui inverse la polarisation, donc le moment cinétique du photon, donc il y a un couple sur la lame.

III - Applications**1 Refroidissement par laser** (Dangoisse lasers)

Qualitatif comme dans Dangoisse. Introduire l'absorption quantifiée à travers les spectres d'absorption des gaz d'atomes (et pas par une quantification des niveaux d'énergie).

2 Effet Compton relativiste (Cagnac, Langlois)

Rayonnement X à λ_0 envoyé sur des échantillons de matière (graphite, bore, ...). On observe un pic à λ_0 que la théorie ondulatoire prévoit (les électrons liés oscillent, en fait ceux pour lesquels $E_{\text{liaison}} > E_{\text{photon}}$, le m dans la formule de Compton est alors celui qui encaisse le recul : l'atome, voire le réseau cristallin dans un solide), et un pic à λ plus grand non prévu. Il s'explique par diffusion Compton avec les électrons peu liés (où $E_{\text{liaison}} \ll E_{\text{photon}}$, qui se comportent comme libres).

Donc finalement l'aspect quantique, via la cinématique (le photon est un corpuscule), explique cet échange d'énergie.

Rq : la section efficace est en fait aussi modifiée par un calcul quantique, mais c'est compliqué (section efficace de Klein-Nishina). On peut aussi parler de diffusion inverse-Compton, où des électrons libres en mouvement peuvent cette fois céder de l'énergie à un photon.

Conclusion et ouverture

L'aspect ondulatoire : fentes d'Young.

 **Remarques**

Le spin nul est interdit car $m = 0$. C'est en lien direct avec l'absence de polarisation longitudinale.

Mécanique quantique et corrélations à distance

La mécanique quantique prédit des corrélations à distances instantanées. C'est effectivement le cas dans des expériences où l'on envoie deux photons intriqués dans des directions opposées : une mesure de polarisation sur l'un entraîne une réduction du paquet d'onde de l'autre photon de façon instantanée (ou en tout cas, expérimentalement, supraluminiques), quelle que soit leur distance de séparation.

Ces corrélations ne permettent pas de transport d'information (heureusement pour la relativité), mais peuvent être observées a posteriori, par exemple en regardant les résultats d'une expérience avec deux polariseurs éloignés pour lesquels on rassemble les données après coup.

La violation expérimentale des inégalités de Bell (voir Basdevant, Mécanique quantique, par exemple), montre que ces corrélations ne peuvent pas s'expliquer par des variables cachées, et qu'elles sont réellement "à distance".

LP 37 – Aspects ondulatoires de la matière. Notion de fonction d’onde

Plan

Bibliographie :

- **Salamito**, Tout en un PCSI 2013 : plan pour le I et II.
- Cap Prépa nouveau programme : complément du Salamito.
- **Cagnac**, Physique atomique I (nouvelle édition) : description détaillée des expériences.
- Aslangul pour compléments.
- **Basdevant**, Mécanique quantique : équation de Schrödinger, partie III.

Manips :

- Diffraction d’électrons, CD du Basdevant.

Niveau L2, pré-requis :

- Interférence et diffraction
- Dualité onde-corpuscule pour le photon.
- TF (attention, pas en prépa)
- Propagation dispersive, paquet d’onde et vitesse de groupe

Introduction

On a vu la dualité ondes-particules pour la lumière. On va voir ici qu’il en est de même pour la matière.

I - Dualité onde-particule de la matière

Suivre le Tout en Un, plus compléments avec le Basdevant.
Donner plein d’OG.

1 Longueur d’onde de de Broglie

Postulé par de Broglie en 1923 par analogie avec la dualité pour la lumière. Motivé par l’explication des spectres de raies discrets comme un phénomène d’ondes stationnaires.
 $\lambda = h/p$. OG!

2 Première vérification expérimentale : Davisson et Germer, 1927.

Manip : le canon à électrons, on peut estimer $\lambda_{\text{électron}}$ à partir du rayon des anneaux. Noter qu’on a fait ça au préalable avec des rayons X et que donc on connaît la structure du cristal. Idem avec des neutrons. Microscopie.

3 Interférences de particules, 1989 avec des électrons.

Manip : Interférence d’électrons avec le CD du Basdevant.
OG. Difficulté si M augmente car $i = \lambda D/a$.

Description probabiliste : $p(M)$, MAIS si on ferme une fente, plus d’interférences. Donc on n’a pas $p(M) = p_1(M) + p_2(M)$. D’où une description ondulatoire comme en optique.

II - Fonction d’onde et probabilités

1 Fonction d’onde

Description de l’état d’une particule : $\psi(r, t)$. $|\psi(r, t)|^2 d^3r = dP$.

2 Ondes de de Broglie

Particules décrites comme des OPPH. On postule $E = h\nu$ comme pour le photon.

3 Principe de superposition et retour sur les interférences.

III - Évolution dynamique de la fonction d'onde

1 Équation de Schrödinger

Établissement motivé (Basdevant). D'abord libre puis dans un potentiel.

Propriétés : linéaire, déterministe, conserve la norme, réversible, ...

2 Paquet d'onde

Nécessité, calcul de la vitesse de groupe (pas de démo) : on retrouve le résultat classique $v_g = p/m$, étalement.

Manip : dispersion d'un paquet d'onde avec le CD du Basdevant.

3 Inégalité d'Heisenberg

4 Une application : Inégalité d'Heisenberg et non-effondrement de l'électron sur le noyau.

Conclusion et ouverture

Vers le spectre des atomes.

Remarques

L'équation de Schrödinger est réversible. Lorsque l'on change t en $-t$, il faut aussi changer i en $-i$.

LP 38 – Confinement d’une particule et quantification de l’énergie

Plan

Bibliographie :

- **Basdevant** : le cours et le livre “problèmes quantiques”.
- **Cagnac**, physique atomique : toutes les expériences historiques.
- Le Bellac : modèle de Bohr
- Tec&Doc PC chimie : pour se souvenir du traitement de l’atome polyélectronique.
- Cohen-Tannoudji : OG de λ (dans un complément)

Niveau L2, pré-requis :

- Photons
- Aspect ondulatoire de la matière, fonction d’onde
- Équation de Schrödinger indépendante du temps
- Corde de Melde

But et fil rouge : aller vers une explication des spectres de raies atomiques.

Points clés : la quantification vient de la description ondulatoire et du confinement (ou des conditions aux limites); on peut faire des OG simples à partir de Heisenberg (le faire pour l’hydrogène).

Introduction

On a vu les postulats de la mécanique quantique, la fonction d’onde et l’équation de Schrödinger, mais il n’y a pas eu de quantification... C’est pourtant l’observation des raies des lampes spectrales qui a motivé de Broglie à supposer la nature ondulatoire de la matière : on va voir que comme en mécanique classique, une onde confinée donne lieu à une quantification des solutions, et donc des énergies.

Manip : lampe spectrale (expliquer comment ça marche, p. 168) + PVD.

I - Mise en évidence de la quantification

1 Résultats expérimentaux, formules de Rydberg, Ritz (Cagnac).

Expérience de Frank et Hertz (1914) : voir Cagnac ; électrons pouvant faire des collisions élastiques (conserver leur énergie cinétique) ou inélastiques (perdent de l’Ec car un degré de liberté interne de l’atome est excité : transition électronique ou rota-vibrationnelle) ; les collisions inélastiques ont lieu seulement à une énergie déterminée W_r ; une analyse de la vapeur montre une raie à $h\nu = W_r$.

Rq : la raie correspond à $\lambda \sim 250$ nm. Quand on regarde le diagramme des niveaux d’énergie du mercure, c’est la première que l’on peut exciter. Noter qu’il existe des transitions de plus basse énergie (dans le visible par ex.), mais elles ont lieu entre des niveaux plus élevés, et il faut donc plus d’énergie pour les atteindre.

2 Premières tentatives d’explications : approches semi-classiques

Modèle de Bohr (et de Sommerfeld avec des ellipses) : Le Bellac. L’hypothèse est la quantification de L , justifiée par cette idée de non-interférence ($L = n\hbar$).

Limites : effondrement de l’électron, non compatible avec Heisenberg, ne prédit pas correctement pour deux électrons, ni Zeeman anormal, ...

Transition sur cette idée d’interférences / ondulatoire.

II - Mécanique quantique ondulatoire : confinement et quantification

L'idée est que la description par l'équation de Schrödinger mène, pour les solutions stationnaires, à $\Psi''(x) + V(x)\Psi(x) = 0$, d'où va naturellement arriver la quantification si l'on contraint Ψ .

Analogie corde de Melde ou optique.

1 Puits infini

CL assez évidentes ici. Analogie corde de Melde.

Montrer avec **Heisenberg** qu'on s'attendait à E_1 .

Application : niveaux d'énergie dans un métal.

2 Puits fini

Motiver les CL proprement (c'est un peu le cœur de la leçon...) : $V(x)$ étant discontinu, ψ pourrait l'être aussi ; faire comme dans Basdevant.

III - Applications

1 Ions colorés (Basdevant, Problèmes quantiques) (si temps, la suite est plus importante).

Raconter aussi avec les mains : plus la molécule est grande, plus il y a de la place, plus δE est petit, etc...

2 Atome d'hydrogène (avec L).

On revient sur la manip de la lampe spectrale.

Démarche simplifiée :

- Noyau infiniment lourd.
- On écrit H avec L en sphériques, pour lequel on connaît les fonctions propres : les harmoniques sphériques $Y_{lm}(\theta, \phi)$.
- On écrit donc $\psi = R(r)Y_{lm}(\theta, \phi)$, puis l'équation sur R avec le potentiel effectif $V_{\text{eff},l}$.
- Les solutions pour R sont quantifiées : $R_{n',l}$.
- On introduit $n = n' + l + 1$. Cas du potentiel en $1/r$: $E = -E_0/n^2$.

Mettre des images avec les niveaux, retrouver la formule de Balmer, conclure que tout va bien.

Atomes alcalins : on a un $Z_{\text{eff}}(r)$, donc le potentiel est différent de $1/r$, et donc $E_{n,l}$.

Conclusion et ouverture

Ouvrir sur les atomes polyélectroniques.

On verra ensuite, avec le même formalisme, le franchissement de barrières de potentiel.

Remarques

Conditions aux limites pour le puits fini

La fonction d'onde et sa dérivée sont continues, même si le potentiel est discontinu. Voir par exemple la démonstration dans Basdevant, où il faut intégrer l'équation de Schrödinger entre $-\epsilon$ et $+\epsilon$, ces deux valeurs définissant la zone sur laquelle varie le potentiel. Lorsque ϵ tend vers 0, on se rend compte que Ψ' est continue. Ψ est donc également continue (ce qui se voit bien avec la théorie des distributions, cf Basdevant au même endroit).

Conditions aux limites pour le puits infini

Pour le puits fini, l'onde évanescente dans la partie interdite décroît sur une distance $\propto 1/V^{1/3}$. Si la profondeur du puits V devient infini, cette distance devient nulle, et on peut avoir discontinuité de la dérivée.

Compter les CL

On impose $\psi = 0$ en plus et moins l'infini : en général il n'y a pas de solution non nulle, sauf pour un nombre discret de solutions.

Autres possibilités

- Oscillateur harmonique.
Application à : modèle d'Einstein ; vibrations des molécules ; modèle en couche en physique nucléaire.
- Autre : deutérium (proton-neutron et potentiel de Yukawa, on trouve un seul état lié, voir entre autres l'épreuve A 2005 où le potentiel est carré).

On peut aussi parler de l'application aux hétérostructures à semi-conducteurs (Pietryk, Panorama de la physique, ou Hecht, Mécanique quantique), qui permettent de réaliser des transistors très hautes fréquences présents dans les téléphones, et des diodes lasers, ... Mais c'est compliqué.

Structure électronique des atomes monovalents

- Structure fine : Couplage spin-orbite (spin électron et moment orbital, i.e., l'électron voit dans son référentiel un proton qui tourne et donc un champ B). Nul si $l = 0$. Mais pour $l = 0$ (et là seulement), le terme de Darwin (l'électron ne ressent pas le champ électrique du proton en un seul point seulement car il est délocalisé) introduit aussi un clivage, aussi appelé structure fine.
- Structure hyperfine : couplage spin électron spin nucléaire.
- Décalage de Lamb : levé de dégénérescence obtenue en quantifiant le champ du noyau.

LP 39 – Effet tunnel

Plan

Bibliographie :

- **Basdevant** : l'essentiel
- **Cohen** : OG sur l'effet tunnel (ou les faire soi-même).
- Levy-Leblond (quantique), Foss, **Basdevant** Énergie nucléaire : modèle de Gamov
- **Aigou, de Wilde**, Les nouvelles microscopies : microscope à effet tunnel (et pas utilisé, mais BUP 699)

Niveau L2, pré-requis :

- Bases de mécanique quantique (équation de Schrödinger, solutions stationnaires, courant de probabilité, ...)

But : comprendre la possibilité d'effet tunnel, voir des exemples où il est à l'œuvre dans des systèmes naturels, et voir un cas où on l'exploite pour construire un appareil de précision.

Introduction

Nature ondulatoire de la matière, on a vu les conséquences sur la quantification lorsqu'on confine une particule. On va voir maintenant que cette description va permettre l'existence d'ondes évanescentes là où, classiquement, la particule ne pourrait pas aller.

I - Qu'est-ce que l'effet tunnel

- 1 **Position du problème**, équation de Schrödinger, ..., justifier les CL proprement, donner la forme des solutions.
- 2 **Coefficient de transmission** : donner le résultat sans calcul.
- 3 **OG de probabilités** (Cohen).

II - Effet tunnel et phénomènes physiques

1 Modèle de Gamov

On utilise le modèle de la barrière épaisse.

Rq : ce modèle néglige les ondes réfléchies deux fois puis transmises.

Barrière de potentiel de hauteur $Z_1 Z_2$, avec $Z_1 + Z_2$ constant, la hauteur est minimale pour $Z_2 = 1$ ou 2 , d'où l'émission privilégiée de particules α (qui ont un E_l/A grand, nombre magique, stables).

2 Molécule d'ammoniac : traitement ondulatoire (Basdevant)

3 D'autres puits doubles

Basdevant p. 98 (Chap. 4, §6) : molécule d'ammoniac. Temps de passage d'une configuration par effet tunnel de 24 Ghz. Pour AsH_3 : cinq fois plus grosse, le temps devient 10^{18} fois supérieur ! Électrons dans un double puits, le temps de passage dépend de la distance entre les puits, et on trouve : 10^{-15} s dans un solide, ils sont donc délocalisés partout, 10^{-3} s dans un gaz, donc ils restent sur leur molécule (les molécules s'approchent lors d'un choc sur des temps beaucoup plus courts).

III - Une application technique : le microscope à effet tunnel

1 Microscope électronique (Aigou, de Wilde, Les nouvelles microscopies, y compris des OGs bien faits)

Expliquer la forme du potentiel.

Expression du courant tunnel, OG.

Résolution : OG

On travaille souvent à courant constant (ainsi pas de collisions car h varie), la hauteur h dépend alors de la différence de potentiel, mais aussi de la densité électronique du substrat : pour un isolant par exemple on n'a rien.

Conclusion et ouverture

Stabilité des molécules, fusion, et autres exemples...

Remarques

Analogie classique de l'effet tunnel

- La réflexion totale frustrée.
- Un rétrécissement dans un guide d'onde pour une onde pouvant se propager dans le guide, mais pas dans le rétrécissement.

Dans les deux cas, l'analogie a lieu parce que la mécanique quantique décrit les particules comme des ondes. En revanche, il y a en mécanique quantique la possibilité de réduire le paquet d'onde lors d'une mesure ou d'une interaction, et donc d'avoir la particule entièrement de l'autre côté de la barrière.

On entend aussi parfois l'analogie avec le saut en hauteur, où le sauteur passe par dessus la barrière alors que son centre de masse reste toujours au dessous. Cela dit ce n'est pas très convaincant, car il s'agit d'un système déformable et qu'il faudrait prendre en compte le travail à fournir pour déformer le système, et qu'on trouverait alors probablement qu'il faut une énergie supérieure pour franchir l'obstacle.

LP 40 – Fusion, fission

Plan

Bibliographie :

- **Basdevant**, Énergie nucléaire : très bien pour tout.
- **Panorama de la physique** : centrales, Tokamaks.

Niveau L3, pré-requis :

- Constituants du noyaux, $r = r_0 A^{1/3}$, radioactivité α et β , énergie de liaison.
- Électromagnétisme : Coulomb.
- Mécanique quantique.
- Section efficace de collision.

Introduction

Pour dégager du temps, on suppose qu'il ne s'agit pas de la première leçon sur la physique nucléaire. Bien situer le contexte : on a vu les constituants du noyau, la formule $r = r_0 A^{1/3}$, les radioactivités α , β et γ , et l'énergie de liaison. Ici, on se concentre sur la fusion et la fission.

I - L'énergie de liaison par nucléon

La fusion et la fission sont énergétiquement favorables grâce à la forme de la courbe $B(A, Z)/A$. On va expliquer pourquoi, puis on va comprendre l'origine physique de cette forme de courbe.

1 Résultats expérimentaux

Montrer la courbe $B(A, Z)/A$.

Rq : Ne pas confondre noyau plus ou moins stable (en terme de temps de vie) et énergie de liaison : il n'y a aucun lien entre les deux.

2 Conséquences : fusion et fission énergétiquement favorables

La fusion est possible entre noyaux légers en dessous du fer, et la fission de noyaux lourds au dessus du fer. Expliquer pourquoi.

Formule $B(A, Z)/A \rightarrow$ on peut dire que pour un nombre de nucléons A donné (un noyau ou des noyaux), la meilleure façon d'abaisser l'énergie du système est de placer les nucléons dans un ou des noyaux qui garantissent une énergie de liaison par nucléon la plus grande possible. D'où la cascade vers le fer. D'où la nécessité d'avoir une courbe en cloche pour avoir de la fusion et de la fission.

On peut aussi directement faire le calcul, par exemple pour $(A, Z) \rightarrow 2 \times (A/2, Z/2)$.

3 Ingrédients physiques : le modèle de la goutte liquide, suivre Basdevant et compléments dans d'autres.

Montrer l'image avec les différentes contributions.

Terme de volume : proportionnel aux nombres de plus proches voisins $\times A$, car interaction nucléaire de courte portée.

Terme de surface : avec le précédent, on compte trop d'interaction puisque les nucléons de la surface ont moins de ppv. Ceci donne une courbe $B(A, Z)/A$ qui explique déjà la fusion des noyaux légers.

Terme coulombien : on perd l'énergie d'interaction électrostatique d'une sphère de charge Z et rayon $A^{1/3}$. On explique enfin pourquoi les noyaux lourds fissionnent : ceci abaisse l'énergie d'interaction coulombienne par nucléon. On gagne à avoir deux noyaux plus petits plutôt qu'un gros.

Les deux autres termes sont moins importants :

Énergie d'asymétrie : favorise $N = Z$ car à $A = N + Z$ fixé, il vaut mieux remplir tout les niveaux les plus bas, or neutrons et protons remplissent des niveaux séparés, donc $N = Z$ (cf exemple de Basdevant). Ce terme explique en fait la désintégration β (pour les noyaux moyennement lourds).

Terme d'appariement : les fermions appariés sont énergétiquement plus bas, car l'énergie nucléaire est attractive et préfère donc un état spatial symétrique, donc de spin antisymétrique, i.e., antiparallèle (l'état singulet). Ne pas détailler.

Rq : la formule pour $B(A, Z)$ explique aussi la vallée de stabilité, surtout vis à vis des désintégrations β . Elle prédit aussi les désintégrations α , mais il faut le modèle de Gamov pour expliquer les temps de vie remarquablement longs des noyaux instables de A pas trop grand (entre 140 et 209, ils sont instables mais à temps de vie très grand).

Conclusion : on sait pourquoi on a de la fusion : réduire l'énergie de surface, et pourquoi on a de la fission : réduire l'énergie coulombienne. On va détailler chacun des processus, et parler d'applications.

II - Fission

1 Exemples et ordres de grandeurs

Donner plein d'ordre de grandeur, comparer avec d'autres quantités (évaporation d'un litre d'eau, montée d'un poids de 1 kg, ...). Toujours de l'ordre de 200 MeV.

2 Modèle de la goutte déformée

On déforme la goutte : l'énergie de surface augmente, mais l'énergie coulombienne diminue. Il y a une barrière de potentiel, qui peut être franchie naturellement (par effet tunnel), ou de façon provoquée par des neutrons.

Rq : le modèle de Gamov pour la désintégration α est en fait un cas particulier.

3 Centrales nucléaires

Principe des centrales à eau pressurisée (cf Basdevant). Rapidement.

La réaction.

Les dispositifs : barres de combustibles, entre lesquelles le milieu modérateur – de l'eau sous pression – ralenti les neutrons pour les rendre thermiques.

Cette même eau chauffée et est pompée en permanence vers un échangeur thermique où elle vaporise de l'eau d'un circuit secondaire qui fera tourner des turbines.

Des barres absorbeuses de neutrons sont là pour contrôler le facteur k . De plus, k diminue en cas de vidage de l'eau, et en cas d'augmentation de la température.

Un contrôle du régime à la limite entre sous-critique et sur-critique est possible car les neutrons sont produits de deux façons : essentiellement directement par la réaction principale, mais aussi indirectement (au bout d'une minute) par désintégration de produits secondaires. On fait en sorte que la production par les neutrons directs soit sous-critique, et que la production totale soit sur-critique uniquement grâce aux neutrons secondaires, on peut ainsi réagir à temps en cas de problème.

III - Fusion

1 Réactions et ordres de grandeur

Donner plein d'ordre de grandeur, comparer avec d'autres quantités (évaporation d'un litre d'eau, montée d'un poids de 1 kg, fission, ...).

2 Modèle de la barrière coulombienne

3 Production d'énergie par fusion

Contrairement à la fission, les équations de la fusion sont non-linéaires, et des résultats à faibles énergies ou petit dimensionnement ne s'extrapolent pas pour des systèmes plus grands.

Critère de Lawson.

Confinement magnétique.

Conclusion et ouverture

Nucléosynthèse, supernovæ, ...

Remarques

Interaction forte et force nucléaire

L'interaction forte est l'interaction entre les quarks, décrite par la chromodynamique quantique. Elle résulte de l'échange de gluons. Ses constantes fondamentales ne sont pas connues. En particulier, on ne connaît pas bien la masse des quarks (par exemple on ne sait pas expliquer pourquoi le neutron est plus lourd que le proton).

La force nucléaire est l'interaction entre les nucléons. Elle résulte de l'échange de méson, les mésons Π par exemple. D'un point de vu fondamental, elle provient de l'interaction entre les gluons, c'est à dire de l'interaction forte.

“Force nucléaire entre deux nucléons” et “interaction forte entre quarks” sont donc analogues à “interaction de Van der Waals entre deux atomes ou molécules” et “force électrostatique entre deux charges”.

Divers

Noyaux miroirs : nombre de protons et de neutrons échangés.

Noyaux n'existant pas : impossible de créer l'état lié.

Noyaux instables : avec une durée de vie finie.

Noyaux stables : temps de vie infini, ne se désintègrent pas.

L'énergie de liaison par nucléon n'a aucun rapport avec le caractère stable ou instable du noyau.

Modèle de la goutte liquide

Justification de $N = Z$: les neutrons et protons peuvent être traités comme des particules indépendantes dans un potentiel. Leurs niveaux sont quantifiés. Ce sont des fermions : on a donc deux neutrons par niveau neutronique, deux protons par niveau protonique. L'énergie totale est donc minimale si $N = Z$. La forme exacte est un développement au premier ordre de l'énergie cinétique d'un gaz de fermions de neutrons plus un gaz de fermions de protons.

Ceci ne prend pas en compte la répulsion coulombienne entre protons, qui fait qu'à A grand, on a $N > Z$ (pris en compte dans le terme coulombien).

Justification de la stabilité des noyaux pair-pair : Un raisonnement analogue à celui que l'on fait pour le terme d'appariement J entre électrons pour le ferromagnétisme montre que l'énergie d'un état neutron up - neutron down est plus faible que celle de l'état neutron up -

neutron up (ou down - down, et idem avec des protons). En effet, si les deux nucléons sont de spin antiparallèles, ils sont dans l'état singulet qui est antisymétrique. La fonction d'onde spatiale est donc symétrique, et donc d'amplitude importante en $r = 0$. Comme l'interaction entre nucléons est attractive, ceci fait que l'énergie d'interaction sur ces états est supérieure à celle où la fonction d'onde serait antisymétrique (qui est associée à l'état triplet de spin, donc parallèle). (L'argument est identique pour les électrons dans le ferromagnétisme, mais le potentiel coulombien est répulsif, c'est donc l'état spatial antisymétrique qui est privilégié, i.e., de spin symétriques donc parallèles.) Ceci explique la dominance des noyaux pair-pair.

Le principe de Pauli permet aux neutrons d'être stable dans les noyaux, car s'ils se désintègrent en proton, il faut placer le proton sur un niveau d'énergie libre, souvent élevé.

Voir Basdevant pour tout ça.

Modèle en couche

L'expérience montre des écarts significatifs au modèle de la goutte liquide pour certains nombres Z et N , dits nombres magiques, pour lesquels les noyaux ont une énergie de liaison plus importante et des temps de vie plus grands.

Ceci s'explique par le modèle en couche : tout comme les électrons en physique atomique forment des atomes plus stables lorsque les couches n sont pleines, les protons et neutrons font aussi la même chose.

Les premiers nombres magiques s'expliquent si on suppose le potentiel harmonique : la dégénérescence des niveaux ($E = (1/2 + n_x + n_y + n_z)\hbar\omega$) et le fait de placer deux neutrons par niveaux (ou deux protons) donne des couches complètes pour 2, 8, 20, 40 neutrons. Les nombres magiques suivants ne sont expliqués qu'avec l'introduction d'un terme de couplage spin-orbite.

Profil de densité du noyau, du proton et du neutron

Expérience de diffusion, avec des particules alpha (mais pas très propre car sensible à l'interaction nucléaire, et une particule alpha est grosse), avec des électrons ou des neutrons.

Avec des électrons énergétiques, on peut sonder un proton ou un neutron seul.

Première indication du caractère non élémentaire du proton et neutron : leur moment magnétique, qui n'est pas donné par la formule de Dirac pour une particule élémentaire de spin 1/2 (et qui devrait être nul pour le neutron).

Radioactivité

Becquerels : coups par seconde.

Gray : unité de dose, correspond à un joule par kg.

Sievert : dose équivalente, ce sont des gray multipliés par un facteur de dangerosité.

Centrales nucléaires

A uranium naturel. Neutrons thermiques. Milieu modérateur : graphite ou eau lourde.

A uranium enrichi. Neutrons thermiques. Milieu modérateur : graphite ou eau. C'est le cas des réacteurs à eau pressurisée (l'eau est sous pression, sinon elle s'évapore) (majorité en France et dans le monde).

Au plutonium. Neutrons thermiques. Pas de milieu modérateur. C'est le cas de super Phénix (mais difficultés car le fluide caloporteur est du sodium liquide). Les neutrons rapides produits servent à produire du plutonium en bombardant des cibles fertiles (d'uranium 238), et on parle alors de surgénérateurs.

LP 41 – Évolution temporelle d’un système quantique à deux niveaux

Plan

Bibliographie :

- Basdevant : tout.
- Rouessac : compléments sur la RMN.
- Perez, Mécanique quantique : compléments.

Niveau L3, pré-requis :

- Mécanique quantique.

Introduction

On considère seulement deux niveaux (il faudra donc que les autres soient loin).
 → une énergie caractéristique ΔE , et donc aussi une fréquence. Conséquences ? battements comme en mécanique classique ? possibilité de forçage et de résonance ?

Motivations : ces systèmes sont des modèles très courants : polarisation de la lumière, liaison moléculaire, ammoniac, spin 1/2 dans un champ B , conformation du cyclohexane, mésomères du benzène, ...

I - Couplage tunnel entre deux puits

On considère une particule dans un puits double. Modélise par exemple un électron dans la molécule H_2^+ , ou bien le plan des hydrogènes dans la molécule d’ammoniac. On se focalise sur un exemple.

1 Description ondulatoire

But : motiver l’existence et la dépendance exponentielle du terme de couplage.

Basdevant. Aller vite, sans calcul : juste motiver avec des mots que les deux niveaux de plus basse énergie sont les états symétrique et antisymétrique, et que la différence d’énergie est exponentiellement décroissante.

C’est compliqué, on préfère une approche matricielle plus abstraite mais plus puissante.

2 Description matricielle

Espace des états = combinaison des deux fonctions propres Ψ_S et Ψ_A .

Construction des états Ψ_D et Ψ_G .

Hamiltonien et opérateur position dans les deux bases. Insister sur les termes non-diagonaux.

II - Oscillations entre les états “classiques”

1 Évolution temporelle d’un état

Écrire l’évolution d’un état droite ou gauche. Fréquence d’évolution.

2 Application à l’ammoniac et à plus lourd

3 Application à la localisation des électrons : dans une molécule, dans un atome gazeux.

4 Application à la stabilité des molécules : abaissement de l’énergie (mais ce n’est pas de l’évolution temporelle).

III - Forçage et résonance

On considère encore la molécule d'ammoniac, mais qu'on place dans un champ électrique variable (pulsation ω).

Rq : on ne parle pas de ce qu'il se passe en champ statique, qui permet justement (s'il y a un gradient) de sélectionner une population.

1 Molécule d'ammoniac dans un champ électrique oscillant

Arriver aux courbes de variation de la probabilité de transition, et de P_{\max} .

2 Application au maser

3 Application à l'horloge atomique

Conclusion et ouverture

Spin dans un champ B_0 , puis forcé par B_1 : c'est exactement pareil. Vers la RMN, les IRM, ... (on peut développer s'il y a du temps).

Remarques

RMN

Atomes dans un champ B_0 .

Leur moment magnétique précesse autour de B_0 , et la composante selon z reste constante. Du point de vue macroscopique, l'évolution vers la valeur de M thermodynamique se fait par interaction entre les atomes : collisions entre eux, avec les parois, avec les vibrations du réseau, ... (cf Cagnac, §7.4). L'aimantation tend alors vers M_0 .

On ajoute un champ tournant B_1 .

L'évolution de l'aimantation macroscopique est alors :

$$d\mathbf{M}/dt = (\boldsymbol{\omega}_1 - \boldsymbol{\delta\omega}) \wedge \mathbf{M} + (\mathbf{M}_0 - \mathbf{M})/\tau. \quad (8.1)$$

On montre que les solutions se composent d'un transitoire (sinusoïdal amorti) et d'un régime permanent. On s'intéresse au permanent (donc après quelques τ). On montre que l'absorption d'énergie de l'onde par le milieu est maximale à la résonance, i.e. à $\omega = \omega_0$: la matière absorbe alors de l'énergie de l'onde 1, et l'aimantation M_z prend sa valeur minimale (mais on reste en régime permanent, l'énergie absorbée est transformée en chaleur et M_z reste constant). Il y a apparition d'une aimantation transverse à B_0 (plan xy), facilement mesurable. (Notons que sans la dissipation, les solutions sont purement oscillantes, et à la résonance M_z oscille entre + et - sa valeur initiale, donc l'échantillon absorbe puis réémet l'énergie (sous forme donc d'émission stimulée).)

Mesures : on varie ω la fréquence du champ tournant, et on observe la variation d'aimantation du matériaux en suivant le flux de B au travers de bobines. Pour $\omega = \omega_0$, M_z est minimale, M_x nulle. Ceci permet donc de remonter à B_0 ressenti par les moments magnétiques.

Ce n'est cependant pas comme ceci que fonctionne un appareil RMN en chimie. Dans ce cas, on envoie un pulse de champ B_1 contenant toutes les fréquences, le système est excité, et relaxe vers l'équilibre. Cette période de relaxation correspond, pour chaque spin, à un régime transitoire entre un état forcé et un état de repos, qui se fait avec sa fréquence propre (qui est proportionnelle au champ B_0 ressenti par chaque spin). Il en résulte, pour chaque ensemble de spins équivalents, l'émission d'une onde dont la fréquence est proportionnelle à B_0 ressenti. C'est la somme de ces ondes qui est analysée par transformée de Fourier.

Remarquons que s'il y avait initialement autant de spin selon $+\mathbf{e}_z$ que selon $-\mathbf{e}_z$, rien ne changerait en moyenne dans l'échantillon (l'énergie du système serait la même), et on ne détecterait rien. Or, à l'équilibre thermodynamique, il y a légèrement plus de spins alignés avec \mathbf{B}_0 que de spins opposés à \mathbf{B}_0 (selon la statistique de Boltzmann, l'énergie étant proportionnelle à $\langle \mathbf{L} \rangle \cdot \mathbf{B}_0$) (le ratio des populations up sur down est 0.999964 à 300 K et avec $B_0 = 5.3$ T). Lorsque les spins se retournent, le nombre de spins dans les états up ou down varie, et il y a donc variation de l'énergie de l'échantillon.

LP 42 – Molécules : stabilité, énergie

Jury :

Si VdW, la nature de cette liaison doit être précisée, ainsi que la raison de la dépendance en r . La distinction entre les OG des divers niveaux d'énergie est appréciée. Discuter la physique du phénomène. Dégager pourquoi la molécule est stable.

Plan

Bibliographie :

- Aslangul 2, Basdevant, Feynman : les idées.
- Grecias Tec&Doc PC ancienne édition : établissement des équations séculaires.
- Jean et Volatron, structure moléculaire : compléments.
- Diu, Physique statistique : vibration et rotation.
- Alloul, physique des électrons dans les solides : rappels sur les approximations.

Manips :

- Paramagnétisme de O_2 .

Niveau L3, pré-requis :

- Orbitales atomiques (hydrogène, et autres atomes).
- Systèmes à deux niveaux, cas de la molécule d'ammoniac.
- Effet tunnel.
- Oscillateur harmonique quantique (pour les vibrations).
- Théorème d'équipartition.

Introduction

Modèle de l'hydrogène, puis des atomes polyélectroniques : explique avec succès les spectres des gaz.

Avec des molécules : il y a aussi des spectres d'émission / d'absorption à expliquer.

De plus, pourquoi les atomes s'associent-ils ? pourquoi cette stabilité ?

I - Stabilité de la liaison chimique

1 Ordres de grandeurs d'énergie (Aslangul 2)

Énergie de liaison (de dissociation),
 énergie des niveaux électroniques,
 de vibration,
 de rotation.

OG, soit directement expérimentaux, soit rapidement comme dans Aslangul.

2 Conséquence : l'approximation de Born-Oppenheimer (Aslangul)

On traite le problème électronique, avec les noyaux fixes, dont la position est un *paramètre* du problème.

3 La liaison chimique vue comme échange de particule

Présentation comme une compétition entre répulsion entre les protons et attraction par échange de l'électron.

Aslangul 2. On explore le cas de H_2^+ , et on se demande si on peut expliquer sa stabilité. Pour ça, il faut faire le calcul quantique exact : c'est compliqué et non généralisable.

Modèle avec deux niveaux (1s de chaque H) et couplage par effet tunnel. Cf Feynman. Utiliser le pré-requis : systèmes à deux niveaux molécule d'ammoniac, pour donner les résultats : élément de matrice non-diagonal dans le hamiltonien, qui est en $\exp(-ZR/a_0)$ (traversée de la barrière, on verra plus tard qu'il s'agit du terme de résonance, cf Atkins pour l'expression). Levé de la dégénérescence, abaissement du niveau d'énergie symétrique. Si on prend en compte la répulsion entre les protons, on obtient un minimum, donc un édifice stable pour le R réalisant ce minimum.

4 Où est le gain : théorème du viriel ?

II - Structure électronique des molécules

1 Approximations

Écrire le hamiltonien.

Approximation de Born-Oppenheimer (noyaux fixes),

approximation orbitalaire (électrons indépendants, avec un potentiel effectif d'interaction : on factorise la fonction d'onde¹),

Combinaison Linéaire d'orbitales Atomiques pour trouver les orbitales moléculaires (méthode variationnelle où on cherche les solutions sous forme particulières, cf Grecias ou Atkins).

2 OM à partir de deux OA (Tec&Doc PC, ou Feynman)

Intégrale coulombienne α_1 et α_2 , de résonance $\beta < 0$, de recouvrement S .

Cas d'OA identiques : déterminant séculaire.

Cas d'OA d'énergies différentes (calcul dans Feynman), ne se couplent pas si différence trop grande.

3 Généralisation à plusieurs OA

N OA donnent N OM.

Recouvrement et résonance nul selon les symétries. OM sigma et pi.

4 Molécule polyélectronique

Cas de O_2 et de N_2 . Manip avec le dioxygène ?

III - Mouvement des noyaux : rotation et vibration

1 Vibration

On se sert du résultat de l'OH déjà connu. OG, montrer un spectre IR.

2 Rotation. Admettre les résultats du rotateur rigide.

3 Capacité calorifique et gel des degrés de liberté (vendre que c'est important pour l'aspect "énergie").

Conclusion et ouverture

La molécule : à mi-chemin entre l'atome et le solide cristallin.

Remarques

Théorème d'Earnshaw : il ne peut pas y avoir de distribution de charges stable par interaction électrostatique seule.

1. Normalement, une fois les solutions obtenues pour les OM de chaque électron, il faut antisymétriser la fonction d'onde totale en utilisant un déterminant de Slater. Cependant, ceci ne change pas les niveaux d'énergie.

Méthode de Hartree-Fock : c'est une méthode plus élaborée, itérative, en champ moyen. On suppose les électrons indépendants, mais évoluant dans un potentiel moyen créé par les électrons eux-mêmes. Les fonctions d'ondes électroniques interviennent donc dans le potentiel sous la forme de leurs intégrales : on cherche en fait les solutions par auto-cohérence. On écrit la fonction d'onde sous forme de déterminant de Slater des $\phi_j(\xi_i)$, et chaque $\phi_i(\xi_i)$ est solution de l'équation de Schrödinger pour une orbitale.

À propos des orbitales moléculaires

Voir article BUP septembre 2016.

Il existe plusieurs méthodes d'approximation qui permettent de tracer des OM, et d'obtenir des niveaux d'énergie. Ce sont des approximations.

Il faut aussi ne pas sur-interpréter la "réalité" des OM. (i) Contrairement à la fonction d'onde polyélectronique totale, elles ne sont pas solution de l'équation de Schrödinger globale, elles sont simplement pratiques car elles vivent dans l'espace à 3D. (ii) Elles sont des approximations et leur forme dépend du schéma utilisé (éventuellement beaucoup!). Elles n'ont aucun coté systématique, contrairement par exemple à la densité électronique obtenue à partir de la fonction polyélectronique (qui est une grandeur mesurable, par diffraction notamment). Les OM veulent représenter ce qu'occuperait un seul électron, alors que ceci n'a pas vraiment de sens car les électrons sont "corrélés" entre eux et n'ont pas d'existence individuelle. Elles ne sont certainement pas mesurables, et servent d'outil intermédiaire. Il est en particulier absurde de dire qu'"une OM représente la densité de probabilité de présence d'un électron occupant ce niveau".

Autre remarque dans l'article sur l'étude des transitions électroniques dans les molécules ou atomes polyélectroniques : on représente souvent le processus comme un électron passant du niveau qu'il occupe à un niveau vacant supérieur. C'est en fait une vision simpliste (dans le cas où les niveaux sont rapprochés), car selon les descriptions on voit qu'un niveau est occupé avec un certain pourcentage, et n'est ni vacant ou occupé. De même qu'on voit que les transitions ont lieu avec un certain pourcentage en provenance de plusieurs niveaux inférieurs.

En bref, c'est compliqué et il ne faut pas trop donner de crédit, ni au niveau de l'exactitude des résultats, ni sur le statut ontologique, des OM et autres niveaux.

Un autre article qui propose une autre approche que celle des orbitales : BUP 996. Il présente la théorie des atomes dans les molécules, basée sur la densité électronique $\rho(\vec{r})$ dans l'espace réel.

Règle de Klechkowski et sous-couches 3d ou 4s

Voir <http://www.chemguide.co.uk/atoms/properties/3d4sproblem.html> et les liens en bas de page pour plus d'informations.

Rappel : l'application stricte de la règle donne 1s2s2p3s3p4s3d4p5s4d5p6s4f5d6p7s5f6d7p.

Mais, pour résumer les liens ci-dessus :

- La sous-couche 3d est plus haute en énergie que la 4s pour les atomes jusqu'à Ca. Donc on a bien l'ordre de remplissage 1s 2s 2p 3s 3p 4s qui correspond aussi à l'ordre des niveaux d'énergie pour les atomes de $1s^1$ (H) à $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$ (Ca).
- Pour les métaux de transition (de Sc en $3d^1$ à Zn en $3d^{10}$, donc remplissage de la 3d), le niveau d'énergie de la 3d passe en dessous de celui de la 4s. Le fait que les niveaux d'énergie des orbitales dépendent de l'élément n'est pas surprenant car les noyaux n'ont pas la même charge, il n'y a pas le même nombre d'électrons, etc...

Il faudrait donc écrire 1s 2s 2p 3s 3p 3d 4s et remplir comme ça.

Mais dans le détail le remplissage est plus compliqué. Si a priori ce serait d'abord la 3d puis ensuite la 4s, en réalité non, des électrons de la 3d sont toujours envoyés dans la 4s par répulsion électrostatique.

Au bout de combien d'électrons dépend des éléments. Au final, la règle de Klechkowski prédit les choses correctement pour les atomes neutres (sauf exceptions Cr et Cu, et en ligne 4 pour d'autres comme par exemple Pa qui surprend...).

Mais le détail permet de comprendre les structures des ions et le fait que la 4s est dépeuplée avant la 3d (et encore, pas toujours, cf exemple avec V+).

Il est d'ailleurs normal que remplir un cations en ajoutant les électrons ne donne pas la même chose que l'application successive de Klechkowski, puisque dans le premier cas on travaille à nombre de protons fixé et on augmente le nombre d'électrons, alors que dans le second cas on augmente en même temps le nombre de protons et d'électrons.

Enfin, les électrons 4s sont bien toujours plus éloignés du noyau que les électrons 3d.

Chapitre 9

Physique statistique

LP 15 – Étude statistique d’un système en contact avec un thermostat. Probabilité canonique.

Plan

Bibliographie :

- Diu physique statistique et Ngô physique statistique : tout.
- Ashcroft : capacité calorifique des solides.

Niveau L3, pré-requis : thermodynamique, ensemble microcanonique.

Introduction

On a vu l’ensemble microcanonique. Or il est peu pratique : on étudie ici un autre ensemble, l’ensemble canonique, qui s’applique lors du contact avec un thermostat, et qui est beaucoup plus pratique.

I - Introduction à l’ensemble canonique

Surtout Diu.

Toujours bien spécifier les variables dont dépendent les fonctions.

1 Ensemble canonique

Définir avec $\{S + T\}$ isolé où T est grand.

2 Probabilité canonique.

3 Fonction de partition $Z(T, V, N)$

4 Calcul de grandeurs thermodynamiques : faire le lien avec la thermodynamique.

En microcanonique, c’est $S(E, V, N)$ qui contient l’information. Ici c’est $Z(T, V, N)$.

Introduire d’abord $F = -kT \ln Z$ comme une définition.

Construire les variables de façon “naturelle” : $U = \langle E \rangle = -\partial_\beta \ln Z$ (par calcul sur les probabilités), d’où $U = F - T \partial_T F$, comme en thermodynamique !

$S = -k_B \sum_l p_l \ln p_l$, d’où on démontre que $S = (U - F)/T$, d’où $F = U - TS$ et donc $S = -\partial_T F$.

Pour la pression, la définir comme $P = -\partial_V F$ par analogie avec la thermodynamique.

Rq : on peut montrer aussi que rendre S_{tot} maximal revient à minimiser F , et que la pression canonique se comporte bien comme une pression.

- 5 Exemple du système à deux niveaux** (on s'en ressert après) (Ngô). Calcul de C_V et gel des degrés de liberté,
ou **II - paramagnétisme**.

II - Chaleur spécifique des solides, modèle d'Einstein

Diu.

1 Calcul quantique, Z .

2 Capacité calorifique C_V .

Comparaison avec l'expérience : Dulong-Petit ok, mais pas ok à bas T où on s'attend à $\propto T^3$. Avec notre calcul, on a un gel des degrés de liberté.

3 Le calcul classique, en admettant $Z = \int d\Gamma/h^{3N} \dots$

4 Théorème d'équipartition (pas de démo, c'est pareil que le calcul classique ci-dessus, ou alors faire l'inverse : d'abord le théorème, après le cas classique...).

Rq : on peut aller vite : poser le problème, dire qu'à bas T on a gel des degrés de liberté, énoncer le théorème d'équipartition, l'appliquer dans le cas présent.

III - Paramagnétisme

Approche simple de Ngô. C'est comme le système à deux niveaux, donc aller vite et ce n'est pas grave si on ne le fait pas. (ou alors ne pas faire le système à deux niveaux et faire ça à la place, en calculant aussi C_v pour montrer le gel des degrés de liberté). La nouveauté est qu'on montre la loi de Curie pour χ .

Attention, Ngô considère le système {un spin} comme thermostaté par le reste du système. Puis calcule E et C_v pour ce système, ce qui est un peu bizarre. Il vaut mieux considérer le système {ensemble des spins}, montrer que la fonction de partition se factorise, et calculer à partir de là.

Conclusion et ouverture

Richesse et puissance de l'approche : gaz parfait, gaz de VdW, ...

Remarques

Théorème d'équipartition

Contribution de $k_B/2$ par degré de liberté quadratique (même si les autres degrés de liberté ne sont pas quadratiques). Il faut que le système soit décrit de façon classique (intégrale continue sur l'espace des phases). Il faut aussi que le degré de liberté varie continûment entre $-\infty$ et $+\infty$ ou entre 0 et $+\infty$.

Un contre exemple : le gaz relativiste, où dans le hamiltonien il y a des γmc^2 , ce qui n'est pas quadratique en l'impulsion.

Voir Diu pour une discussion complète.

Températures négatives

Voir Diu, Physique statistique. Il est possible d'avoir des températures négatives pour des systèmes possédant un nombre fini d'états accessibles (ce qui exclut les systèmes où les parti-

cules peuvent avoir une énergie cinétique), et une gamme d'énergie finie. Pour E_{\min} et E_{\max} , la dégénérescence est en générale faible, et l'entropie est donc quasi nulle, d'où l'existence d'une zone où S décroît.

Un système avec $T < 0$ est plus chaud qu'un système avec $T > 0$, dans le sens où si deux tels systèmes sont mis en contact, c'est celui avec $T < 0$ qui cède de l'énergie à l'autre.

Enfin, il n'y a aucun problème à définir des $T < 0$ pour ces systèmes (les paradoxes habituels ne s'appliquent pas car le nombre d'état est fini).

On peut réaliser expérimentalement de tels systèmes, à l'aide de spins sur réseau cristallin. On a constaté expérimentalement les résultats mentionnés plus haut sur le transfert d'énergie.

LP 43 – Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques

Plan

Bibliographie :

- **Diu** : physique statistique et thermodynamique
- **Ngô et Ngô** : tous les calculs simples.
- Choimet, Précis Bréal de thermodynamique : pour l'utilité de C_V , C_P .
- **Aschroft et Alloul** : chaleur spécifique des solides.

Manips :

- Mesure de la vitesse du son pour confirmer expérimentalement la valeur de C_p/C_v .

Niveau L3, pré-requis :

- Thermodynamique.
- Ensemble canonique, fonction de partition.

Introduction

On les a utilisées en thermodynamique, on les connaît expérimentalement. Peut-on les calculer ?

I - Définition et idées importantes

1 Définition et importance

Avec le premier principe : $dU = C_v dT$, d'où l'importance expérimentale. Signification physique de C_V : quantité de chaleur qu'il faut apporter au système à volume constant pour élever sa température de 1 K.

Définition thermodynamique, puis de physique statistique ?

Rôle de $C_v > 0$ pour la stabilité des systèmes (Diu thermo).

2 Théorème d'équipartition

Pas de démo, mais donner clairement les hypothèses (cf aussi p. 213).

Boltzmann, plus dépendance quadratique sur une plage $\gg k_B T$, ...

3 Modèle à deux niveaux, Ngô.

Permet d'introduire le gel des degrés de liberté. Faire le calcul au tableau des populations des états, puis de C . Introduire la température de gel. En dessous, $C = 0$, au dessus ou proche, il faut faire le calcul (pas de théorème d'équipartition ici car le système n'est pas semi-classique : pas de Hamiltonien avec des variables continues).

Par la suite, à assez bas T on se ramènera à deux niveaux seulement, et donc la forme du début du dégel des degrés sera la même (à un facteur de dégénérescence près).

II - Capacité calorifique des gaz parfaits

1 Gaz monoatomique

Les niveaux électroniques sont gelés, ceux translationnels non (sauf à $T < 10^{-18}$ K), OG.

2 Gaz diatomiques

OG rotation et vibration avec des modèles simples.

Poser les modèles quantiques et les fonctions de partitions.

Éviter les calculs en utilisant soit équipartition à haut T , soit le modèle à deux niveaux pour le début du dégel (pas pour la fin du dégel, là ça dépend des détails, cf le cas des rotations).

Conclure en traçant le graphe $C_V(T)$.

III - Capacité calorifique des solides cristallins

1 Résultats expérimentaux et problématique

C'est une belle histoire entre expérience et théorie. D'abord N oscillateurs harmoniques, puis équipartition : loi de Dulong et Petit.

Rq : à haut T , les effets anharmoniques font qu'en fait on n'atteint pas $3Nk_B$.

2 Modèle d'Einstein

Modèle de champ moyen.

Ok car c_v tend vers 0, mais pas avec la bonne dépendance.

3 Modèle de Debye Rapidement, ou ne pas faire si on n'est pas à l'aise. Lire la conclusion de Diu.

L'idée : Le modèle d'Einstein ne comporte qu'une unique pulsation, dont sont séparés les niveaux. Il y a donc nécessairement un gel des degrés de liberté (contraire à l'expérience où $c \propto T^3$), et pour l'éviter il faudrait des niveaux qui se resserrent quand on approche du fondamental. L'idée est que c'est possible si on couple les oscillateurs (classiquement, ceci change leurs pulsations propres). On a donc N oscillateurs atomes reliés par des ressorts. On applique le PFD : tout est couplé, donc on va faire des combinaisons linéaires qui "diagonalisent" le système d'équations. Ce sont les phonons, qui sont les modes propres du système. Chacun obéit à une équation d'oscillateur harmonique avec une pulsation $\omega(q)$ qui vérifie la relation de dispersion $\omega(q) = 2\omega_0 |\sin(qL/2)|$. D'un point de vue quantique, on fait le calcul comme la somme de tout ces OH. Puis approximation de Debye : on linéarise $\omega(q) \propto c_s q$. Et calcul : $c_v \propto T^3$.

Conclusion et ouverture

C_v pour d'autres systèmes simples : gaz de photons, de Fermion, ...

Remarques

- La courbe C_V pour l'activation du niveau rotationnel possède un maximum.
- Les cas de H_2 et de D_2 sont particuliers, car la fonction d'onde doit posséder certaines symétries, du fait des spins nucléaires. (De façon générale, le traitement quantique est légèrement différent pour les molécules homonucléaires, car les deux atomes sont indistinguables).
- Pour une molécule diatomique, il n'y a que deux degrés de rotation, pas trois. En effet, le troisième (selon l'axe de la molécule) possède un moment d'inertie très faible. L'écart entre les niveaux étant en \hbar^2/I , il est très grand, et donc toujours gelé. (On peut aussi dire que strictement, la fonction d'onde est symétrique, et une telle rotation ne change que sa phase, donc rien, donc c'est strictement inexistant ?)
- La structure fine des niveaux électroniques met en jeux des différences d'énergie de l'ordre de $T_0 \sim 100 K$ (voir Diu). Si $T \ll T_0$, elles ne sont pas activées. Si $T \gg T_0$, elles sont activées. Mais il y a un nombre fini (et petit) de telles transitions : pas question d'appliquer le théorème d'équipartition. À haute température, tout se passe comme si les niveaux étaient dégénérés, et il n'y a pas d'effet visible. Pour $T \sim T_0$, il faut les prendre en compte dans le calcul. Voir Diu.

- Le théorème d'équipartition dit qu'il y a (pour les degrés non gelés) $k_B/2$ par terme quadratique dans le hamiltonien. Pour la vibration d'une molécule diatomique, il y a deux termes quadratiques (x^2 et p^2), d'où une augmentation de $2 \times k_B/2$.

LP 44 – Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation du champ moyen

Jury :

Connaître les ordres de grandeurs de susceptibilité, d'aimantation, de champ magnétique. L'origine microscopique de l'interaction d'échange doit être discutée. Aspect phénoménologique du champ moyen. Faire apparaître les propriétés essentielles d'une transition de phase. Citer des applications.

Plan

Bibliographie :

- Diu physique statistique : pour la transition ferro/para.
- Diu thermodynamique.
- Ngô, Physique statistique : le paramagnétisme (plus simple que Diu).
- BFR électromagnétisme 4.
- Ashcroft, Tremolet, ...

Manips :

- Clou chauffé.
- Domaine de Weiss (voir Tremolet pour explication de la manip).

Niveau L3, pré-requis :

- Magnétisme macroscopique (aimantation, H , χ , ...).
- Courbe d'aimantation des ferromagnétiques.

Attention, bien se laisser du temps pour la dernière partie, qui traite de para/ferro dans l'approximation de champ moyen !

Introduction

On a déjà vu le magnétisme dans la matière (notion d'aimantation, de susceptibilité, H , ...). Ici, on cherche des interprétations et des expressions pour la susceptibilité. Deux grandes classes de matériaux : paramagnétique et ferromagnétique (il y a aussi le diamagnétisme, mais ils le sont tous).

I - Origine microscopique

1 Moment cinétique et magnétique

Cas du modèle de Bohr, puis généralisation quantique.

2 Origine du para- et ferro-magnétisme

Avec les mains : les moments magnétiques s'alignent. Indépendants ou pas.

Un calcul classique ne suffira pas, car on ne connaît pas μ ou r pour les orbites électroniques de façon classique. (Et en plus, le théorème de Van Leeuwen dit que le calcul complètement classique donne $\chi_{\text{para}} + \chi_{\text{dia}} = 0$.)

II - Le paramagnétisme

- 1 Calcul de la susceptibilité magnétique, Ngô, Diu pour complément. Arriver à la loi de Curie pour χ .

2 Application à la désaimantation adiabatique : juste mentionner que $S = S(B_0/T)$, et donc on peut désaimanter en refroidissant si $S = \text{cst.}$

III - Le ferromagnétisme

1 Cadre d'étude

Rappel sur les courbes d'aimantation, explication avec les domaines.

Ici on considère un seul domaine, la courbe est donc différente (pas d'hystérésis).

2 Le terme de couplage J

Origine. N'est pas magnétostatique. Expliquer avec les mains (cf remarques).

3 Le hamiltonien de Heisenberg et l'approche champ moyen

Le Hamiltonien. Nécessité d'approximation. Arriver à l'équation d'autocohérence (qui est la même que pour le paramagnétisme, mais avec le champ effectif supplémentaire).

4 Transition de phase en champ nul

...et continuer jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de temps.

Discuter de la comparaison avec l'expérience, et de l'existence de modèles plus élaborés (Ising, numérique, ...).

Conclusion et ouverture

Les domaines de Weiss font que les propriétés macroscopiques sont différentes. Mentionner des applications.

Remarques

Intégrale d'échange

Interprétation microscopique du terme de couplage $-J\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$.

Ce n'est pas une interaction magnétostatique.

Provient d'une énergie coulombienne d'interaction plus ou moins faible lorsque les spins interagissant sont alignés (état triplet symétrique, donc la partie spatiale est anti-symétrique et les deux électrons plus loin l'un de l'autre) ou antiparallèles (état singulet antisymétrique, donc la partie spatiale est symétrique et les deux électrons peuvent être proches, si bien que l'énergie de répulsion coulombienne moyennée sur la fonction d'onde est grande).

Attention, cette interprétation n'est pas rigoureuse. Il arrive en effet couramment que J soit négative.

Voir Diu, note de bas de page 16 du complément III.j.

Divers

Beaucoup d'atomes possèdent un moment magnétique lorsqu'ils sont isolés, mais peu le conservent lorsqu'ils font partie d'un édifice : seuls le font ceux possédant une couche 3d, 4f ou 5f incomplète (qui forment alors des para, ferro, ou antiferro selon le signe et l'importance de J).

Deux modèles pour décrire un état cristallin, ou solide en général et liquide : magnétisme dans le modèle des électrons localisés et modèle des électrons quasi-libres.

Modèle des électrons localisés (liaisons fortes) :

- Les électrons restent attachés aux noyaux et ont plus ou moins les mêmes propriétés que libres.
- S'applique aux isolants et aux métaux de terres rares (car les électrons responsables du magnétisme sont les 4f ou 5f, et ceux de conduction les s ou d). Marche pour les ferrites.
- C'est le modèle vu en cours.

Modèle des électrons libres :

- Pour les électrons de conduction délocalisés partout.
- S'applique aux métaux (dont Fe, Ni, Co cristallisés).
- Les électrons possèdent un spin non nul, donc on est forcément paramagnétique (ou ferromagnétique si on tient compte des interactions). (On est aussi toujours diamagnétique.)
- Le gaz d'électrons libres possède des propriétés magnétiques. On parle de paramagnétisme de Pauli (très inférieur au paramagnétisme ionique), de diamagnétisme de Landau, de ferromagnétisme itinérant.
- Si on néglige les interactions entre électrons, on trouve du diamagnétisme et du paramagnétisme, les deux étant du même ordre de grandeur (le para est 3 fois plus fort que le dia).
- Le modèle paramagnétique est très similaire à celui des atomes magnétiques sur réseau : ici l'entité de base est l'électron, la statistique est différente, mais c'est pareil : B fait que les électrons s'alignent majoritairement sur B et l'amplifient. Lorsque l'on fait l'hypothèse d'une statistique de Boltzmann, on trouve la même chose que pour le paramagnétisme des atomes sur réseau. En fait, avec une statistique de Fermi-Dirac, cette valeur est réduite d'un facteur T/T_F et est donc très faible à température ambiante (voir Diu, Physique Statistique, Complément VI.A).
- Avec interactions : la raison du ferromagnétisme est que deux spins antiparallèles ne peuvent pas être au même endroit, alors que deux parallèles peuvent. Au total, c'est comme si les spins antiparallèles se repoussaient fortement.

Voir Diu, physique statistique ; BFR, ...

Plusieurs modèles

Les modèles les plus connus de la transition ferro/para sont :

- Le modèle de Heisenberg. L'approximation consiste en la description des interactions spin-spin par le terme $-J\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$. On peut le résoudre numériquement.
- Heisenberg en champ moyen. Néglige les fluctuations. Prédit un transition, mais peut se tromper (à 1D par exemple). Mêmes résultats quelle que soit la dimension, J , ...
- Ising : ne garde que $S_{z,i}S_{z,j}$ (suppose que les composantes x et y sont nulles en moyenne). Soluble exactement en 1D (ne prédit alors pas de transition) et 2D (transition, mais les exposants critiques ne sont pas bons).

LP 46 – Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Jury :

Bien montrer les hypothèses et les limites du modèle de Drude. Distinguer grandeurs microscopiques et grandeurs moyennes.

Plan

Bibliographie :

- Alloul, Physique des électrons dans les solides : très bien et concis.
- Ashcroft : tous les détails.
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques : théorie des bandes facile.
- BUP 550 : compléments.

Manips :

- Mesure de la résistance du cuivre (bobine, montage 4 fils).
- Influence de T : chauffage au sèche-cheveux de la bobine précédente.

Niveau L3, pré-requis :

- Électromagnétisme.
- Physique statistique : gaz parfait de fermions, phonons.

Introduction

Énoncer la loi d'Ohm $U = RI$, et la loi d'Ohm en statique (pré-requis) $j = \sigma E$. Il y a des conducteurs, des isolants, des semi-conducteurs. On veut des interprétations microscopiques de tout ça.

I - Modèle de Drude

Ashcroft.

1 Hypothèses

Gaz parfait classique d'électrons, chocs en moyenne tous les τ .

OG : pour $n \sim 10^{29} \text{ m}^{-3}$, $v_{\text{th}} \sim 10^5 \text{ m/s}$, et pour 1 A dans 1 mm^2 , $\langle v \rangle \sim 0.1 \text{ mm/s}$.

2 Résultats pour la conductivité

Arriver à $j = \sigma E$ avec $\sigma = ne^2\tau/m$.

Manip : mesurer σ pour le cuivre. Connaissant n , en déduire τ , puis évaluer v_{th} et en déduire $l_{\text{mfp}} \sim 10 \text{ \AA}$.

3 Résultats pour l'effet Hall (seulement si raisonnable au niveau du temps).

Il faut alors écrire l'influence des collisions comme un terme de frottement visqueux en $-p/\tau$ (dire que ça revient au même que l'approche probabiliste, voir Alloul pour une démo simple).

Établir $R_H \equiv E_y/(j_x B) = -1/(ne)$, intéressant car ne dépend pas de τ .

4 Limites du modèle

Dépendance de σ en la température.

Gaz parfait classique implique $c_v = (3/2)k_B$ jamais observé.

Résistance de Hall parfois du mauvais signe (mais ce n'est pas non plus expliqué par le modèle de Sommerfeld).

Loi de Wiedmann-Franz non correcte.

Collisions mal identifiées...

II - Modèle de Sommerfeld

1 Nécessité d'une statistique quantique, conséquences

Donner T_F . C'est $\gg T_{\text{amb}}$.

2 Résultats

On reste dans les mêmes hypothèses qu'avant. On a les mêmes résultats, sauf que ce sont les électrons à v_F qui contribuent. Donc tout idem, sauf l_{mfp} .

Wiedmann-Franz est maintenant correcte, et la dépendance $\sigma(T)$ aussi (car collision avec les phonons, en nombre $\propto T$).

3 Limites du modèle

C'est mieux, mais :

R_H inchangé,

qui sont les électrons qui conduisent ? pourquoi y-a-t-il des isolants ?

III - Structure de bandes

1 Pourquoi des bandes

Approche des liaisons fortes. Voir Alloul et Durupthy. Tracer des bandes.

2 Isolants et conducteurs

Selon l'occupation des bandes.

3 Semi-conducteurs

Selon le gap.

Conclusion et ouverture

Remarques

Capacité calorifique due au phonons : $C_v \propto Nk_B(T/\Theta_D)^3$.

On peut aussi lire la page sur les agrégats métallique dans "Panorama de la physique".

Modèles donnant la structure de bande

Modèle des liaisons fortes (tight-binding) ou approche LCOA en chimie

On amène depuis l'infini les ions et leurs électrons. Le couplage entre orbitales atomiques donne des orbitales moléculaires avec des niveaux plus espacés. Comme il s'agit d'un couplage avec $N \gg 1$ orbitales, on a en fait un continuum autour du niveau initial de chaque OA de l'ion libre : c'est la structure de bande.

Modèle avec interaction avec la structure cristalline (électrons quasi-libre).

Modèle de Bloch : électrons indépendant évoluant dans un puits de potentiel faible et périodique. La structure de bandes apparaît ici car le potentiel est périodique.

Rq : pour les liquides métalliques, la structure de bande disparaît. Ceci peut être prédit par le modèle des liaisons fortes si les bandes se recouvrent. C'est aussi prédit par le modèle des électrons quasi-libres car les bandes proviennent alors de la nature périodique du potentiel.

Modèles de type jellium (électrons libres ou quasi-libres)

Indépendants de la structure de bande, on suppose ici que le spectre en énergie $E(k)$ est donné, par exemple par les théories du paragraphe précédent.

Modèle de Drude : électrons de conduction = gaz parfait classique.

Électrons indépendants (pas d'interaction entre eux), électrons libres (pas d'interaction avec le réseau → pas une très bonne hypothèse), électrons à l'équilibre thermodynamique. Classique. Donne une conductivité électrique et thermique, mais rien ne prévoit le temps de libre parcours, ni ce que sont les collisions.

La distance de libre parcours observée est bien plus grande que la distance entre ions : ce n'est donc pas ça. Mais le modèle de Drude suppose juste “des collisions”.

Recherche de quantités indépendantes de τ : effet Hall, résistivité en AC, loi de Wiedmann-Franz (fausse d'un facteur 2).

Modèle de Sommerfeld : électrons de conduction = gaz parfait quantique (statistique de Fermi, électrons représentés par leur fonction d'onde).

Prédit une loi de Wiedmann-Franz qui est correcte.

MP 17 – Métaux

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Asch.
- Taillet, dictionnaire : définir un métal.
- Quaranta.
- Aschroft et Alloul.
- Cap Prépa pour des OG de conductivités de non métaux.
- Landau, Élasticité : vitesses P et S.

I - Propriétés thermiques

1 Mesure de D du cuivre.

Prendre la barre de 50 cm. On peut faire avec la phase et l'amplitude. Fréquence au GBF : 1 mHz (pour avoir 2 mHz pour T , et on calcule que la profondeur de peau est de l'ordre de $L_{\text{barre}}/4$).

Chauffage par une résistance chauffante : est-ce qu'on impose T ou le flux ? Peu importe, les deux vérifient la même équation, et si c'est le flux ça introduit seulement un déphasage constant.

Noter que λ varie de 5% entre 0 et 100 degrés. Erreur dans la constante du Quaranta ? (sans importance)

2 Comparaison avec d'autres métaux (barrettes avec cristaux liquides qui se désordonnent de plus en plus si T augmente et changent de couleur).

II - Propriétés électriques

1 $\rho(T)$ pour la bobine de cuivre.

2 Loi de Wiedmann-Franz (Aschroft pour les valeurs).

R_q : La constante de Lorenz de la théorie de Drude-Sommerfeld n'est en fait pas correcte à T_{amb} . C'est 2.2 tabulé au lieu de 2.44 théorique (cf les valeurs de Aschroft).

On peut vérifier la loi pour plusieurs températures, car c'est essentiellement ρ qui varie avec T , et pas λ (heureusement, sinon notre mesure de λ ne voudrait pas dire grand chose).

3 Comparaison avec d'autres en faisant chuter des aimants dans des tubes : courants de Foucault.

Cf Garing. Ce n'est pas quantitatif.

III - Propriétés mécaniques

Propagation d'ondes : Avec le Dural, mettre en évidence les ondes P et S, remonter à E et σ (module d'Young et coefficient de Poisson) (en supposant ρ connu).

Faire avec les angles d'extinction (et non pas avec les temps de parcours). Les valeurs des vitesses sont dans le Handbook, pour peu que ce soit le même alliage. Les formules qui donnent les modules sont dans Landau, élasticité.

Pour un métal, $E \sim 100$ GPa (mais ce n'est pas propre aux métaux, les autres solides sont similaires).

Si on a le temps, on peut faire la **recalescence du fer**.

Conclusion et ouverture

Industrie, extraction, différentes propriétés vis-à-vis de l'oxydoréduction (et donc de la corrosion).

Remarques

Capteurs de température pour le cuivre : LM35DZ.

Ils sont linéaires en la température en Celsius (et pas affine : calibrés pour par le constructeur). Dans la plaquette, il y a un AO avec gain $\times 10$.

Il s'agit d'une diode alimentée par une source de courant fixe (un montage type miroir de courant avec deux transistors). On a, pour une jonction PN : $I = I_S [\exp(eV/k_B T) - 1]$, donc pour I fixé, la tension V est proportionnelle à T (attention, on a en fait $I_S \propto T^3 \exp(-\epsilon_g/k_B T)$, mais on néglige cette dépendance). Voir Asch, capteurs de température.

Dural

Le Dural est un alliage d'aluminium-cuivre-autre chose.

Lien vitesses-coefficients élastiques

Voir Landau, élasticité.

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}, \quad (9.1)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}. \quad (9.2)$$

Le coefficient de Poisson est $0 \leq \sigma \leq 1/2$ (typiquement 0.3). Il rend compte de la dilatation selon x et y si l'on comprime le matériau selon z (pas de dilatation s'il est nul). (Rq : il existe des matériaux "exotiques" avec $-1/2 \leq \sigma < 0$.)

Rq : les vitesses ci-dessus sont celles des ondes P et S, qui sont établies pour un milieu infini. Par exemple dans le cas d'une barre, elles ne correspondent pas aux vitesses des ondes longitudinales et transverses, qui sont $v_{\text{longi, barre}} = \sqrt{E/\rho}$ et la vitesse transversale est plus complexe à déterminer car la propagation est dispersive. On peut remonter aux vitesses P et S connaissant $v_{\text{longi, barre}}$. Voir BUP 987. Il n'est pas clair de savoir à partir de quand le milieu peut être considéré infini, et à partir de quand on passe de $v_{\text{longi, barre}}$ à la vitesse des ondes P (l'équation pour v_l ci-dessus)...

MP 18 – Matériaux semi-conducteurs

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Asch.
- Dictionnaire de la physique.
- Quaranta.
- Ashcroft et Alloul et Diu (physique statistique).
- Dangoisse.

Introduction

Petite introduction avec dessin des bandes de conduction et de valence.

I - Semi-conducteur intrinsèque : CTN

1 Caractéristique courant-tension

Mesurer courant et tension (alimenter par une source de tension continue variable, mesure du courant avec la tension aux bornes d'une résistance). Montrer à l'oscilloscope en XY qu'on a une droite : c'est bien une résistance.

2 Loi $R(T)$ (Duffait électronique)

Remonter à ϵ_g .

Sur agitateur magnétique chauffant. Prendre $R \ll 50 k\Omega$ qui est la résistance de l'eau.

Faire un point dans la glace et un dans l'eau bouillante.

II - Semi-conducteur extrinsèque

Avec la plaquette à effet Hall.

1 Conductivité en champ nul : on mesure la conductivité du semi-conducteur (sans champ B) en prenant différents couples (U, I) . On montre donc que ça se comporte comme une résistance.

Ne pas utiliser le régulateur de courant. Comparer avec du cuivre.

2 Résistance de Hall et densité de porteurs : $n \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Dans l'électroaimant. Mesurer B en direct avec le teslamètre (pas d'étalonnage). On est obligé d'utiliser le régulateur de courant (ou alors de réajuster le courant à une valeur constante à la main à chaque mesure...), car l'offset dépend du courant (voir remarques).

3 Dépendance de n en T

Faire chauffer, et mesurer R_H , puis en déduire $n_{\text{porteurs}}(T)$. Interprétation : à bas T (à T ambiante), on est dans le régime extrinsèque, c'est-à-dire :

- Tous les porteurs apportés par le dopage sont dans la bande de conduction (car T suffisamment élevée);
- les électrons de la bande de valence ne peuvent pas franchir le gap (T trop faible) et ne participent pas.

À haut T :

- Les électrons apportés par les impuretés sont toujours tous dans la bande de conduction;

— les électrons de la bande de valence peuvent aller dans celle de conduction, on retrouve une loi de type semi-conducteur intrinsèque, avec $n \propto \exp(-E_g/2k_B T)$.

Ceci montre un avantage du semi-conducteur : faible dépendance en T dans le régime extrinsèque.

Rq : l'avantage par rapport au métal est que n_{porteur} est beaucoup plus faible, et donc R_H plus grand et plus facilement mesurable.

III - Applications

La photorésistance : temps de recombinaison (avec stroboscope, avec la photodiode comme témoin de l'éclairement).

Interprétation : la photorésistance est un semi-conducteur intrinsèque ; s'il est éclairé par des photons d'énergie supérieure au gap, il peut en absorber, ce qui fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Il se crée ainsi une paire électron-trou, qui augmente la conductivité. Ce processus est relativement rapide. En revanche, lorsqu'on coupe l'éclairement, le temps de recombinaison des paires (donc le temps qu'il faut aux électrons pour redescendre dans la bande de valence) est plus long.

Conclusion et ouverture

Diodes, transistors, photodiodes, diodes lasers, tout l'électronique depuis un demi-siècle.

Remarques

Pour la plaquette à effet Hall

Ne pas étalonner l'électroaimant, mesurer directement avec le teslamètre (penser à retourner la sonde, ou pas parce qu'en pratique ça donne la même chose).

Il y a présence d'un offset : même à champ nul, la résistance de Hall n'est pas nulle. Ceci est dû à l'asymétrie des soudures : si elles ne sont pas à la même hauteur, il y a une chute de tension ohmique entre les deux, proportionnelle au courant.

Pour enlever cet offset : inverser le courant dans la plaquette ne marche pas, il faut inverser B . Pour B assez grand, l'hystérésis ne pose pas de problème (négligeable) (ou alors réfléchir : si on travaille à I constant, l'offset est constant, on peut le garder et en parler).

Diode Schottky

Il s'agit d'une jonction semi-conducteur/métal, par exemple dopé N/métal. Il n'y a ainsi que les porteurs majoritaires qui participent (les électrons). L'avantage principal est une tension de seuil plus faible, et surtout un temps de commutation bloqué-passant beaucoup plus rapide. Il n'y a en effet pas de nécessité de recombinaison électrons-trous. Lors de la conduction les électrons sont directement injectés dans la bande de conduction du métal, et lors de la polarisation inverse ils sont directement stoppés.

On peut donc l'utiliser en hautes-fréquences et hyper-fréquences.

Diode Gunn

Pas vraiment une diode. Il s'agit d'un semi-conducteur en trois zones : N++, N-, N++. Alimentée par un courant, une instabilité fait qu'elle se comporte comme une résistance négative. Elle peut osciller à très haute fréquence. On réalise un oscillateur à fréquence fixe en utilisant une cavité résonante comme filtre. C'est ce qui est utilisé dans le banc hyperfréquence.

CTN, CTP

CTN : coefficient de température négatif. C'est un semi-conducteur (oxyde métallique).

CTP : coefficient de température positif. Par exemple du titanate de baryum, dont la résistance est faible au dessous de sa température de Curie (constante diélectrique grande) (c'est un ferroélectrique), et grande au dessus.

Semi-conducteurs

Voir Diu Physique statistique ; Alloul ; Principes d'électronique, ...

Semi-conducteur intrinsèque

À $T = 0\text{K}$, bande de valence pleine (d'énergie maximale ϵ_v) et bande de conduction vide (d'énergie minimale ϵ_c). À $T > 0$, les électrons peuvent occuper des états dans la bande de conduction, et le matériaux devient conducteur. Le nombre de porteurs de charge suit la loi

$$n_i = p_i \propto T^{3/2} \exp(-\epsilon_G/2k_B T). \quad (9.3)$$

C'est cette loi qui est exploitée pour une thermistance, et qu'on peut tracer expérimentalement.

On peut calculer le potentiel chimique à $T = 0$: $\mu = (\epsilon_c + \epsilon_v)/2$. (Comme le remarque Diu, on définit parfois μ comme l'énergie à fournir pour ajouter une particule au système, et on pourrait donc penser que $\mu = \epsilon_c$; mais on peut aussi définir μ comme l'énergie gagnée si l'on enlève une particule du système, ce qui donnerait $\mu = \epsilon_v$. Cette définition n'est en fait pas valable ici, et le calcul montre que μ est la moyenne des deux.

Semi-conducteur extrinsèque

On ajoute des atomes avec un électron de valence supplémentaire (arsenic, phosphore). L'énergie ϵ_d de cet électron est alors légèrement au dessous de ϵ_c , et il suffit d'une température très faible pour qu'il passe dans la bande de conduction. De même, si l'on ajoute un atome avec un électron de valence de moins (gallium, indium), on ajoute des états vacants d'énergie ϵ_a légèrement au dessus de ϵ_v , et il suffit d'une température très faible pour que les électrons de la bande de valence aillent les peupler, libérant ainsi des trous dans la bande de valence.

À température ambiante, tous les électrons ajoutés par les impuretés N sont dans la bande de conduction (donc $n_c = N$) et tous les niveaux vacants fournis par les impuretés P sont occupés (correspondant à autant de trous, $n_p = P$). Pour un dopé N dans le régime extrinsèque (où $N \gg n_i$), le potentiel chimique est entre ϵ_c et ϵ_d , alors que pour un dopé P, il est entre ϵ_v et ϵ_a .

D'où l'explication sur la dépendance de n en la température dans le montage.

Jonction PN Voir Diu et notes.

Chapitre 10

Signaux

LP 21 – Rétroaction et oscillations

Plan

Bibliographie :

- **Granjon**, Automatique : très bien pour la partie asservissement et pour l'intro.
- ... : juste pour les diagrammes de Nyquist des systèmes d'ordre 1 et 2.
- **Précis bréal** électronique : oscillateurs à relaxation.
- Cap Prépa PCSI : modèle de l'AO.
- **Cap Prépa PC** : stabilité d'un système bouclé.
- **Duffait** électronique : moteur asservi en position.
- **Krob** : oscillateur de Wien (montage et théorie)
- Sanz PC nouveau programme : le laser comme oscillateur.
- On peut probablement remplacer beaucoup des références ci-dessus par un livre de cpge nouveau programme de PSI ou PT, car rétroaction et oscillations ont leurs propres chapitres.

Manips :

- Le moteur asservi en position (éventuellement).
- L'oscillateur à pont de Wien.

Niveau : L2, pré-requis :

- Systèmes linéaires, fonction de transfert.
- Amplificateur opérationnel.
- Laser.

Introduction

On peut parler du régulateur à boules de Watt sur les machines à vapeur, qui est l'un des premiers systèmes de rétroaction industriel.

I - Généralités sur les systèmes bouclés

- 1 Objectifs** : l'exemple du chauffage d'une pièce (Granjon), pas de connaissance parfaite du système, ni des perturbations (le Soleil à travers la fenêtre, ...), donc une commande en boucle ouverte n'est pas possible : rétroaction.

2 Outils : on étudie les systèmes linéaires, donc : diagrammes de Bode et Nyquist. Blocs.

3 Boucle ouverte et boucle fermée

Schéma sur le cas du chauffage, FTBF et FTBO et lien entre les deux.

II - Stabilisation par rétroaction

1 Stabilisation par bouclage

Sensibilité aux perturbations.

2 Cas d'un système du premier ordre, exemple de l'amplificateur opérationnel
(Précis Bréal : le cas du non-inverseur).

En bouclant le système du premier ordre, on voit que gain \times bande passante est constant (ne pas faire le calcul).

Application à l'AO (être bref).

3 Stabilité des système bouclés : Nyquist

Énoncer le critère. Seulement le cas du critère du revers, i.e. quand la FTBO est stable (n'a pas de pole à partie réelle positive). Il porte sur la FTBO : c'est pratique. Cas des ordres 1 et 2. Notion de marge de stabilité.

4 Cas d'un système du second ordre : asservissement en position d'un moteur à courant continu

Décrire le montage, aller vite sur la fonction de transfert du moteur. Deuxième ordre : ici on conserve le produit ω_0/Q .

Montrer un schéma avec dépassement, rapidité, précision, ...

III - Oscillateurs quasi-sinusoïdaux

On utilise les systèmes bouclés différemment.

1 Structure d'un oscillateur quasi-sinusoïdal (Précis Bréal)

Schéma comme pour les systèmes asservis, mais rétroaction positive (l'entrée est alors du bruit quasi-nul).

Nécessité d'amplifier et de filtrer.

2 Condition d'oscillation

La FTBF est $A/(1 - AB)$, donc on intuite qu'il faut $AB = 1$ pour une certaine pulsation. Ce n'est pas tout à fait exact : ce qu'il faut, c'est que le système soit instable, donc qu'il y ait dans la FTBF un pole à partie réelle positive, donc que (critère de Nyquist avec les nouvelles conventions) $AB > 1$ dans le diagramme de Nyquist de la FTBO.

Pour AB passant par 1 exactement, on a un pole à partie réelle nulle, i.e. $\exp(mt) \cos(\omega t + \phi)$ avec $m = 0$, donc une solution purement oscillante. Pour $m > 0$, et donc $AB > 1$, on a saturation par les non-linéarités et donc un signal moins sinusoïdal. Mais ça oscille tout de même.

Donc en résumé, la condition $AB = 1$ n'est pas une condition d'oscillations, mais une condition d'oscillations sinusoïdales. Cela se voit bien si on la démontre en utilisant le schéma bloc de l'oscillateur et en aboutissant à $AB \underline{e} = \underline{e}$, donc $AB = 1$: pour faire tout ce raisonnement on utilise la notation complexe et donc on suppose (implicitement) que le signal e est exactement sinusoïdal.

Bien remarquer que : $AB > 1$ en module donne une condition sur le gain (statique par ex., ce qui se traduit par une conditions reliant les valeurs des composants du montage), alors que $\arg(AB) = \arg(1) = 0$ est le critère qui sélectionne la fréquence des oscillations : il faut que le retour soit en phase pour être amplifié.

3 L'oscillateur à pont de Wien

Illustrer ce qu'on vient de dire.

Plein de chose à dire : traitement comme dans Krob : décomposer en deux blocs, FTBF, condition de Barkhausen à partir de la FTBF, facteur de qualité du filtre (1/3), équation temporelle et naissance des oscillations (critère redondant avec Barkhausen, on voit que ça marche), saturation par les non-linéarités de l'AO.

4 Le laser (ou en ouverture si pas le temps).

Sanz nouveau programme.

Conclusion et ouverture

Évoquer les oscillateurs astables, le laser, ... Oscillateur de Van der Pol, qui modélise les linéarités de façon sympathique et décrit bien une bifurcation de Hopf. Oscillateur à quartz.

Remarques

C'est probablement beaucoup trop long comme ça.

Schémas blocs

Raisonnement en schéma bloc et multiplier les fonctions de transfert n'est possible que si les impédances d'entrée des blocs sont très grandes devant les impédances de sortie des blocs.

Modèle de l'AO

Modèle de l'AO en tant que système du premier ordre : c'est une approximation. Il y a dans un AO trois étages : comparateurs, amplificateurs, push-pull ; la fonction de transfert est donc a priori d'ordre trois au moins.

Performance des asservissements

Produit gain \times bande passante constant (lorsque l'on compare le produit en boucle ouverte et en boucle fermée) : C'est vrai pour les systèmes du premier ordre. Pour ceux du second ordre, on n'a pas ce résultat (cf Granjon à performance des asservissements) ; en revanche on a ω_0/Q constant. À partir du troisième ordre, on n'a plus rien de systématique.

(Granjon) Pour un système avec fonction de transfert sans intégrateur (sans facteur $1/p$), l'erreur statique (notion de précision) est non nulle, en $1/(K+1)$, où K est le gain statique. On voit qu'il faut un K grand, or K grand rapproche du point -1 dans le diagramme de Nyquist et réduit la marge de stabilité.

Système avec FTBO en $1/p$: erreur sur la précision nulle. Mais erreur de traînée non nulle.

Erreur de traînée nulle si FTBO en $1/p^2$.

Dépassement : ...

Rapidité : ici aussi, compromis entre K grand et stabilité.

Influence de Q sur la pureté des oscillations

On dit qu'un grand facteur de qualité implique des oscillations pures et une grande précision en fréquence. Par exemple pour les horloges à quartz l'un des intérêts du quartz est d'autoriser des facteurs de qualité immenses. Voir remarques du montage correspondant p. 254.

On peut expliquer ceci en écrivant l'équation différentielle vérifiée par une des grandeurs lorsque le régime est encore linéaire : $\frac{d^2u_3}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}(1 - KA_0)\frac{du_3}{dt} + \omega_0^2u_3 = 0$.

On a des oscillations (quasi sinusoïdales ou non) dès que le coefficient en facteur de $\frac{du_3}{dt}$ est de signe différent des autres termes, donc dès qu'il est négatif, donc dès que $KA_0 > 1$.

Pour que les oscillations soient quasi sinusoïdales, il faut que ce terme en facteur de $\frac{du_3}{dt}$ soit négatif mais très petit en valeur absolue. Il faut donc $KA_0 > 1$ tout en ayant $\frac{\omega_0}{Q}|1 - KA_0| \ll 1$.

On voit bien que cela est facilité par une grande valeur de Q . On peut par exemple se placer à $KA_0 = 1.1$, soit 10% au dessus du seuil ce qui est largement suffisant, tout en ayant $\frac{\omega_0}{Q}|1 - KA_0| \ll 1$. Lorsque c'est le cas, les phases où le système est non-linéaire sont très courtes, donc le signal très pur, et la pulsation très proche de ω_0 (on rappelle que plus le système passe une partie importante d'une période dans le régime non linéaire, plus la pulsation s'éloigne de ω_0).

LP 22 – Traitement d’un signal. Étude spectrale.

Plan

Bibliographie :

- Cap Prépa PCSI et PC.
- Garing : filtre passe-bas acoustique (impédance d’un mur).
- Appel, Mathématiques pour la physique : cadre mathématiques des transformées de Fourier.
- Duffait : filtres, modulation d’amplitude.

Manips :

- Sommer sous Python des sinus pour reconstituer un triangle ou un carré.
- TF à l’oscilloscope de l’enregistrement de diapasons.
- Filtre RC passe-bas.
- Multiplier des signaux ou, mieux, manip de l’effet Doppler.

Niveau L1, pré-requis :

- On ne parle pas de transformée de Fourier.
- On suppose les signaux infiniment bien discrétisés : pas de considération de résolution (en ouverture).
- On peut avoir déjà vu le diagramme de Bode lors de l’étude de la résonance du RLC ou d’un oscillateur mécanique.

Introduction

I - Décomposition de Fourier et analyse spectrale

But : décomposer un signal sur une base sympathique.

1 Série de Fourier d’un signal périodique

Maths : on peut décomposer en série de Fourier.

Idée : le coefficient n contient l’information sur l’harmonique n .

Application à deux sinus, au carré, au triangle, **les montrer en python** (sommer la série de Fourier) (pour le carré : phénomène de Gibbs, voir Appel).

2 Application à l’étude spectrale d’un signal

Application pour extraire des informations d’un signal inconnu : **manip** avec deux diapasons et un micro, faire la TF à l’oscilloscope.

Rq : le signal n’est pas périodique, on imagine en fait qu’il l’est avec une période égale à sa durée totale (c’est équivalent à considérer la transformée de Fourier du signal en imaginant qu’il est nul en dehors de son domaine d’existence, i.e., on a $c_n = TF[s](\omega_n)$).

II - Systèmes linéaires, fonction de transfert et filtrage

But : agir sur un signal (dérivation, intégration, filtrage, ...). D’après le théorème de Fourier, un signal quelconque se décompose comme somme de signaux harmoniques. Si en plus le système est linéaire, on peut entièrement le comprendre en étudiant uniquement ces signaux harmoniques.

1 Système linéaire

Définition.

2 Fonction de transfert

Attention car on n'utilise pas la TF. Donc dire qu'on envoie un $\cos(\omega t + \phi)$ et qu'on regarde la sortie. Ensuite, on envoie le signal périodique, somme de tous, puis linéarité. Définie pour un signal harmonique uniquement.

Diagramme de Bode en amplitude et en phase. Pulsation de coupure.

Lien avec l'équation différentielle. Par exemple une pente de -20dB signifie intégration.

3 Application au filtrage

Détailler le filtre RC (avec **manip**) : passe-bas, comportement BF et HF du condensateur, calcul de G et de ϕ , caractère intégrateur, ... Montrer gain et déphasage à l'oscilloscope.

Puis réjecteur de bande (bruit à 50 Hz), oscillateurs auto-entretenus, ...

4 Filtrage acoustique, voir Garing, si temps.**III - Hétérodynage, exemple du radar routier**

Expliquer le principe, identique que celui du montage. Dans un vrai radar, les ondes sont des ondes hyperfréquences, donc trop rapides pour être suivies pendant assez longtemps. Donc on multiplie pour se ramener à basse fréquence, puis filtre passe bas (on se ressert du passe-bas précédent). Montrer la **manip** si possible.

Sinon modulation d'amplitude, mais c'est plus long.

Conclusion et ouverture

Filtres actifs.

 **Remarques****Filtres**

Pour un filtre réel $H = N/D$, le degré de D est supérieur à celui de N .

Ordre d'un filtre : le degré de son dénominateur.

Théorème de d'Alembert : toute fonction de transfert $H(p) = N(p)/D(p)$ se décompose en produit de fonctions de transfert d'ordre un ou deux (à coefficients réels) (avec $p = j\omega$, on a en effet des polynômes en $j\omega$ en formalisme complexe).

Tout système linéaire invariant dans le temps peut-il se représenter par une équation différentielle ? Il semble que oui, même si c'est une équation avec un nombre infini de termes.

Voir par exemple la fonction retard, de fonction de transfert $H = \exp(-j\omega t_0)$, qui se traduit par l'équation différentielle $s(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} (t_0^n/n!) d^n e(t)/dt^n$.

Le fait qu'un système linéaire invariant opère uniquement par différentiation/intégration/multiplication est en fait essentiel, car c'est de là que vient une propriété cruciale : si l'entrée est de forme sinusoïdale, alors la sortie aussi. C'est précisément parce que $\exp' = \exp$ que les fonctions sinusoïdales sont privilégiées.

LP 47 – Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

Jury :

RLC tout seul : insuffisant. Il regrette de ne pas voir les cavités résonantes. Aspect énergétique important. Insister sur la généralité du phénomène. Faire le lien entre mode propre (régime libre) et résonance.

Plan

Bibliographie :

- Taillet, dictionnaire de la physique : définitions (résonance, facteur de qualité).
- **Cap Prépa** sup : tout sur le RLC.
- **Brebec**, Ondes : résonance d'un système à plusieurs degrés de liberté.
- BUP 851 et **Garing** : la corde de Melde comme une cavité Fabry Perot.
- Dangoisse : cavité Fabry-Pérot.

Manips :

- Corde de Melde.
- Éventuellement circuit RLC.

Niveau L2, pré-requis :

- Régimes transitoires du RLC.

Introduction

Définir résonance et mode propre (Taillet). Importance (quartz) ou désavantage (pont de Tacoma) ou phénomènes naturels (marées).

Buts et messages :

Le facteur de qualité caractérise à la fois le temps de relaxation vers l'équilibre lors d'une perturbation, ET la largeur de la bande de résonance.

Faire le lien entre mode propre (régime libre) et résonance.

I - Résonance d'un système à un degré de liberté

Cap Prépa sup.

On s'intéresse aux systèmes harmoniques amortis (très courants dans la nature : électron élastiquement lié, amortisseur de voiture, modèle d'Einstein des solides...). Pour être concret, on prend le cas du circuit RLC.

1 Résonance en tension, en intensité, en puissance.

2 On peut, ou non, faire l'analogie électrique/mécanique pour un amortisseur+ressort.

Attention, aller vite et ne pas détailler les calculs. Surtout montrer les diagrammes de Bode, faire un schéma bilan avec les conditions pour avoir résonance, montrer le lien avec la fréquence du régime libre (dans la limite où $R \rightarrow 0$).

II - Systèmes à plusieurs degrés de liberté

1 Deux pendules couplés : H-prépa. Donner les résultats. Message : deux résonances, correspondant aux modes propres.

2 Corde de Melde : BUP 851 ou Garing.

Le traiter comme une cavité, avec un coefficient de réflexion non parfait. Permet d'expliquer l'amplitude finie à la résonance, d'avoir le facteur de qualité.

Manip : corde de Melde, estimer le facteur de qualité en comptant les oscillations en régime libre, montrer une résonance, montrer en analysant le spectre des oscillations libres que les résonances correspondent aux modes propres.

Idée physique de la résonance : on force le système à sa fréquence propre, si bien que l'énergie est toujours apportée en phase, et explose. Il y a ensuite des mécanismes qui modèrent cette explosion : non-linéarités (qui n'étaient pas incluses dans le modèle considéré), et/ou phénomènes de dissipation (qui n'étaient pas non plus dans le modèle).

III - Applications

Cavité Fabry-Perot (Dangoisse).

Conclusion et ouverture

Marées, montres, ...

Résonance paramétrique (voir remarques MP 31, p. 259).

 **Remarques****Modes propres**

Définition : C'est une notion définie en régime libre. C'est une solution *harmonique* des équations différentielles régissant le système, et compatible avec les solutions aux limites. De façon plus physique, c'est un signal harmonique pouvant exister lorsque le système est excité puis laissé libre d'évoluer.

Pour des équations linéaires¹, les modes propres sont orthogonaux et forment une base des solutions. On peut décomposer toute solution du régime libre comme somme de modes propres, et un système excité dans un mode propre y reste. Il y en a autant que de degrés de liberté dans le système.

Exemple : pour un pendule simple, il y a un unique mode propre, qui est $u = A \cos(\omega_0 t + \phi)$, avec A et ϕ déterminés par les conditions initiales. Le système en régime libre est effectivement nécessairement dans ce mode là.

Autres exemples : le pendule double couplé par torsion (où n'importe quelle solution libre est la somme, avec des coefficients constants dépendants de CI, du mode antisymétrique et du mode symétrique), la corde de Melde (il y a une infinité de modes propres).

La définition donnée précise bien *harmonique*. Ce n'est plus possible lorsqu'il y a de la dissipation (les solutions sont amorties exponentiellement). Dans le cas d'une faible dissipation, on peut étendre la notion de mode propre aux solutions pseudo-harmoniques en $\exp(-\lambda t) \cos(\omega t + \phi)$. Quand la dissipation est trop forte, il existe encore une base des solutions, mais qui peut être un ensemble d'exponentielles amorties (sans oscillations). Appeler ces solutions "modes propres" ou "pseudo modes propres" ou rien du tout est une affaire de définition...

1. Pour un système régi par des équations non-linéaires, on peut toujours considérer une base de l'ensemble des solutions, par exemple les séries de Fourier si les conditions aux limites sont périodiques, et décomposer toute solution sur cette base. Par contre, les non-linéarités couplent les modes entre eux, et un système excité dans un mode propre n'y reste pas. Autrement dit, les coefficients de la décomposition sur la base dépendent du temps, de même que l'énergie est transférée d'un mode à l'autre.

Résonance

Définition :

On entend parfois qu'il s'agit de la pulsation pour laquelle le transfert d'énergie est maximal. C'est une définition trop restrictive, qui concerne uniquement les résonances en puissance. On peut avoir des résonances autres qu'en puissance, par exemple la résonance en tension du circuit RLC. Le point essentiel est qu'il faut s'intéresser à une grandeur pertinente (la tension peut être intéressante si on veut rester en dessous de la tension de claquage du condensateur par exemple).

Modes propres et résonance

Pour un système sans dissipation, les résonances ont lieu aux fréquences propres.

Pour un système avec dissipation, ce n'est plus nécessairement le cas. Remarquons qu'il faut d'abord que les modes propres restent définis...

Prenons le cas du circuit RLC série, avec u la tension aux bornes du condensateur et i l'intensité dans le circuit :

Régime libre (qui définit les modes propres) :

- $Q = +\infty$: oscillation de u et i à ω_0 .
- $Q > 1/2$: oscillations amorties de u et de i à $\omega_0 \times \sqrt{1 - 1/(4Q^2)}$ (même fréquence pour u et i).
- $Q = 1/2$: u et i de la forme $(At + B) \exp(-\lambda t)$.
- $Q < 1/2$: u et i amortis exponentiellement (sans oscillations).

En régime forcé :

- $Q = +\infty$: résonance pour u , i , et la puissance, à ω_0 .
- $Q > 1/\sqrt{2}$: résonance de u à $\omega_0 \times \sqrt{1 - 1/(2Q^2)}$ (ce qui est différent du pseudo mode propre du régime libre),
résonance de i et de la puissance à ω_0 (ce qui est différent du pseudo mode propre du régime libre).
- $Q < 1/\sqrt{2}$: pas de résonance pour u , résonance de i et de la puissance à ω_0 (ce qui est différent du pseudo mode propre du régime libre, qui est alors somme d'exponentielles décroissantes sans oscillations).
- $Q < 1/2$: la fonction de transfert pour u se factorise en produit de deux fonctions de transfert du premier ordre. Pente cassée dans le diagramme de gain.

On voit donc que pour Q fini, il n'y a plus de lien entre mode propre du régime libre et fréquence de résonance. Le pire des cas est lorsque $Q = 1/2$, où le mode propre est $\exp(-\lambda t)$, et où les résonances en intensité et puissance ont lieu à ω_0 ...

Résonance et adaptation d'impédance

LP 48 – Oscillateurs ; portrait de phase et non-linéarités

Plan

Bibliographie :

- **Bergé**, L'ordre dans le chaos : pour plein de choses.
- Strogatz au cas où.
- Aschroft : dilatation des solides et l'écart à Dulong Petit par anharmonicité.
- Dangoisse : génération d'harmoniques en optique.
- **Krob** : oscillateur de VdP.
- **Portelli** : toute la théorie sur VdP, à présenter au choix.
- **Brasselet**, ou H-prépa mécanique : bases sur le portrait de phase de l'oscillateur harmonique.

Manips :

- Oscillateur de Wien.
- Pendule avec deux aimants.
- Portrait de phase avec Pplane.

Niveau L3, pré-requis :

- La leçon rétroactions et oscillations.
- Modèle de Debye, de l'électron élastiquement lié, ...

Introduction

Motivations : donner des outils permettant de modéliser et comprendre les systèmes non-linéaires, qui par ailleurs sont omniprésents et très complexes.

I - Du linéaire au non linéaire : le cas du pendule pesant

L'importance de l'oscillateur harmonique : omniprésent : dès que l'on a un potentiel avec un minimum, le développement au premier ordre donne l'équation de *l'oscillateur harmonique*.

Cependant, ce modèle linéaire est parfois insuffisant. Exemples :

- Le pendule pesant.
- Le modèle de l'électron élastiquement lié : termes NL à fort champ E , par exemple pour l'effet Kerr ou pour la génération d'harmoniques en optique.
- Ions sur un réseau dans un cristal : potentiel anharmonique pour expliquer la dilatation thermique et les écarts à la loi de Dulong et Petit ($C_v < 3Nk_B$ en pratique, or l'égalité provient du théorème d'équipartition qui suppose l'harmonicité).

MAIS les systèmes non-linéaires sont compliqués à étudier. On va présenter ici des OUTILS, en se basant d'abord sur un EXEMPLE : le pendule pesant.

1 Le pendule pesant : un potentiel non-linéaire

Équation avec l'énergie, intégrale du mouvement, et potentiel.

Outil : le potentiel, l'intégrale du mouvement.

2 Portrait de phase (outil très important)

Construction en lien avec le potentiel et l'énergie.

3 Perte d'isochronisme

Formule de Bordas et perte d'isochronisme (pas de démo formelle, car ce n'est pas si intéressant...),

4 Généralisation à d'autres potentiels non-linéaires (où on voit que c'est une approche super-puissante)

Portrait de phase avec Pplane du double puits (avec et sans dissipation).

OU oscillateur mécanique avec les deux aimants (**manip**).

Introduire les centres.

II - Génération d'harmoniques par anharmonicité**1 Le pendule pesant**

FFT d'un enregistrement à 10 et 100 degrés (**manip**).

2 Génération de seconde harmoniques pour le laser

Voir Dangoisse p.183, mais faire plus simple. Changer ses notations et introduire un ϵ adimensionné.

Transition

Jusque là, seulement des oscillateurs libres (pas d'apport d'énergie).

Or dans la nature : beaucoup d'oscillateurs entretenus : ex. dans le livre *Ordre dans le Chaos* :

- Oscillations de Von Karman derrière un obstacle (application au bruit éolien) (c'est une bifurcation de Hopf).
- Glycolise ?
- Autre ?

Problèmes d'un oscillateur linéaire (Bergé) : linéaire donc amplitude quelconque, or dans la nature les oscillations saturent à un niveau bien défini ; avec de la dissipation, amortissement : il faut une source d'énergie, mais pas linéaire sinon il y a divergence.

⇒ *Systèmes avec apport d'énergie, qui vont saturer avec des non-linéarités.*

III - Oscillateurs entretenus, cycles limites, et dissipation non-linéaire

(Portelli)

1 Cycles limites et oscillations

Manip avec Wien.

La théorie linéaire des oscillateurs prédit une croissance exponentielle. Mais saturation par effets NL, i.e., ici la saturation de l'AO : compliqué.

VdP et son équation (qui est en particulier réalisée par le circuit du même nom) permet de décrire de façon théorique une saturation NL, avec un modèle simple. Rq : on ne fait pas le montage, on discute plutôt l'équation modèle. On l'illustre avec Wien.

2 Étude d'un système à dissipation non-linéaire : l'équation et l'oscillateur de Van der Pol

Équation, **manip** : Pplane.

Étude analytique :

- $\epsilon < 0$: instable, c'est une bifurcation de Hopf.
- $\epsilon \ll 1$: oscillation quasi-sinusoïdale, démo de l'amplitude $x \propto \sqrt{\epsilon}$ (Bergé, avec l'énergie, facile).

- $\epsilon \gg 1$: oscillations de relaxation, calcul de T_0 et explication avec le portrait de phase, donner l'amplitude ?

Applications réelles : allée de Von Karmann et bruit éolien.

Ouverture et conclusion

De l'ordre au chaos.

Remarques

Bifurcations

Voir L'Ordre dans le Chaos (Bergé, Pomeau, Vidal). Annexe sur les différents types de bifurcations.

Exemples à ne pas confondre :

- Bifurcation fourche : on passe d'une solution stable d'amplitude nulle à deux solutions stables stationnaires. Cas de la convection de Rayleigh-Benard.
- Bifurcation de Hopf : on passe d'une solution stable d'amplitude nulle à deux solutions qui sont des oscillations de type $\rho \cos(\omega t)$. Cas de l'oscillateur de VdP (mais pas strictement pour celui à pont de Wien).

Pour l'oscillateur à pont de Wien, on n'a pas une amplitude proche du seuil en $(\epsilon - \epsilon_c)^{1/2}$. À la place, l'amplitude ne dépend pas de ϵ_0 . Elle est déterminée par la saturation de l'AO, soit en tension (alors $V_{max} \sim 4V$), soit en courant (alors $V_{max} \sim 5.8V$), soit en temps de montée (voir Krob, électronique). C'est parce que l'élément non linéaire a une caractéristique trop abrupte qu'il ne permet pas d'obtenir une équation de type Hopf.

Cauchy-Lipschitz

Unicité de la solution d'un système d'équations différentielles étant donnée la condition initiale. Conséquence importante : pas de recoupement de trajectoire dans l'espace des phases (pourvu que la donnée d'un point dans cet espace soit équivalente à une CI).

Poincaré Bendixson

Le chaos n'est possible qu'à 3D ou plus. En effet, les solutions bornées $(x(t), y(t))$ du système

$$\begin{cases} x' = f(x, y) \\ y' = g(x, y) \end{cases} \quad (10.1)$$

sont soit convergentes soit tendent vers un cycle limite (donc sont périodiques). Intuitivement ceci se comprend, car les trajectoires dans le plan (x, y) suivent le champ de vitesse $\mathbf{v} = (f(x, y), g(x, y))$, qui ne peut pas donner lieu à n'importe quoi.

Par contre à 3D ce n'est plus vrai (cf le système de Lorenz, ou bien l'oscillateur double puits forcé, ou la balle de ping-pong) :

$$\begin{cases} x' = f(x, y, z) \\ y' = g(x, y, z) \\ z' = h(x, y, z) \end{cases} \quad (10.2)$$

admet des solutions chaotiques.

Dans le cas du double puits forcé, le forçage avec un terme $\cos(\omega t)$ ajoute en fait une dimension : on peut l'écrire $\cos(\phi(t))$, avec $\phi(t) = \omega t$ ici (c'est donc la troisième équation, ϕ étant la troisième variable). Ce que l'on représente à l'oscilloscope est alors la projection des trajectoires dans le plan normal à ϕ . En particulier, dans ce plan les trajectoires peuvent se couper. (On pourrait étudier ce chaos en traçant une section de Poincaré.)

MP 4 – Capteurs de grandeurs mécaniques

Plan

Bibliographie :

- Asch, Capteurs.
- Duffait, électronique.
- Technique de l'ingénieur r1812 : accéléromètre.
- Landau, élasticité : fréquence fondamentale pour la règle encastrée.
- Quaranta I (mécanique) : flèche de la règle encastrée en statique.
- BUP 804 : effet Doppler.

Introduction

Capteur : Transforme une grandeur physique en une grandeur électrique, plus pratique à manipuler.

Au moins pour un cas, discuter de :

- la sensibilité (dérivée de la grandeur de sortie sur la grandeur d'entrée) : tous,
- la résolution (plus petite valeur d'entrée entraînant une variation de la valeur de sortie),
- la justesse (on tombe en moyenne proche de la valeur vraie) : pour l'effet Doppler on remonte bien à c_{son} ,
- la fidélité (erreur aléatoire faible),
- la précision (l'erreur totale commise) dépend alors de la fidélité et de la justesse (et de la sensibilité),
- le temps de réponse : diagramme de Bode de l'accéléromètre,
- la finesse (perturbe peu le milieu) : l'effet Doppler ne le perturbe pas, l'accéléromètre un peu selon sa masse, le capteur de position introduit des frottements.

I - Capteur de position

Capteur potentiométrique de position

Tracer la droite position en fonction de la tension.

Donner la sensibilité. La résolution n'est pas évidente à mettre en évidence...

II - Capteurs de vitesse

1 Effet Doppler, BUP 804.

Pour avoir une résolution de 1 Hz il faut une acquisition de plus de 1 s, et en plus échantillonner la porteuse à 40 kHz : pas possible (demande trop de points). D'où l'hétéroynage.

- Linéarité : tracer δf en fonction de v .
- Sensibilité : $\delta f \propto f_{\text{émis}} V/c$.
- Résolution : $1/T$ où T est le temps d'acquisition.
- Fidélité (faire plein de fois la manip pour avoir une incertitude statistique réelle, avec des temps d'acquisition différents). De façon théorique, la fidélité (la précision) dépend de la durée d'acquisition, en $1/T$.
- Justesse : le fait de bien retrouver la vitesse du son, d'avoir une droite linéaire.

- Temps de réponse : égal au temps d'acquisition T (donc compromis avec la fidélité). Dans tous les cas, ne peut pas excéder f_{porteuse} .
- Résolution spatiale : taille de l'obstacle $> \lambda$ (sinon diffraction), d'où l'intérêt d'une porteuse haute fréquence (sinon c'est inutile, sauf pour maximiser le temps de réponse et ne pas faire de bruit audible).

Applications : vitesse des voitures, des étoiles, du sang dans les veines, ...

2 Dynamo tachymétrique (à ne pas faire si pas le temps)

Prendre le moteur asservi en vitesse (mais on ne réalise pas l'asservissement). Alimenter le moteur en continu. Regarder la tension aux bornes de la génératrice. Tracer cette tension en fonction de la vitesse de rotation, qu'on mesure grâce à un stroboscope (ou grâce au capteur de vitesse présent sur le moteur).

Voir Asch. Plein de choses à dire : U diminue à haute vitesse à cause de la réaction magnétique d'induit ? Non-linéarité de la loi, ondulation car collecteur, ...

Sensibilité, validité de la loi linéaire.

III - Capteur d'accélération

Accéléromètre (capacitif trois axes).

1 Étalonnage statique

Droite tension/force pour un poids attaché par une corde, et on fait tourner la platine. Permet de mesurer g (sensibilité en V/g), de mesurer la verticale (sensibilité en rad/V).

2 Réponse fréquentielle

Diagramme de Bode du capteur avec excitation par un pot vibrant.

Contrôler l'amplitude du pot vibrant avec le capteur inductif (on l'étalonne au préalable pour montrer qu'il est linéaire, il devrait donner une réponse correcte jusqu'à ~ 500 Hz).

Tracer $(V_{\text{acc}}/V_{\text{inductif}})/f^2$ en fonction de f . On a une pente en $1/f$ assez tôt. Faire beaucoup de points à basse fréquence.

3 Application : mesure du module d'Young d'une poutre. On peut aussi le mesurer en statique pour comparer. Formule dans le Landau d'élasticité.

Rq : on ne discute pas la résolution en fréquence lors de l'utilisation pour la poutre.

Conclusion et ouverture

Il y a bien d'autres capteurs...

Remarques

Notice de l'accéléromètre 3 axes

The sensor is a polysilicon surface micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to determine the magnitude and direction of the acceleration.

Autres

- Jauge de contrainte. R varie en fonction de la déformation. Tracé de R /poids appliqué. On remonte au facteur de jauge, qui est donné dans la formule (c'est un facteur d'étalonnage). Il y a deux jauges de contraintes, ce qui compense une dilatation (température par exemple).
- Capteur d'impact, i.e., balance piézoélectrique. Droite masse/tension. \sim ok
Marche mieux en flexion qu'en compression. Donc pince ou bien le poser sur un anneau.
Modèle du piézoélectrique : condensateur avec Q qui dépend de la contrainte, plus résistance de fuite en parallèle (qui fera que la capa de mesure se décharge).
- Capteur inductif.

MP 22 – Amplification de signaux

Plan

Bibliographie :

- Duffait, Électronique.
- Maxifiches.

Introduction

Micro + HP, on n'entend rien. Il faut amplifier.

Buts :

- augmenter $P = UI$;
- avec une bonne adaptation d'impédance :
transmettre U_{micro} vers l'ampli $\Rightarrow Z_e \gg Z_{\text{micro}}$,
transmettre P de l'ampli au HP $\Rightarrow Z_s \simeq Z_{\text{HP}}$.

I- Le transistor bipolaire

1 Tracé des caractéristiques

Duffait (chapitre composants), Maxi Fiches. On utilise le montage simple à deux alimentations.

- À V_{ce} maintenu fixe, faire 5 ou 6 points aux multimètres. Tracer $I_c = f(I_b)$ et $V_{be} = f(I_b)$.
- À l'oscilloscope, montrer en XY quelques caractéristiques $I_c = f(V_{ce})$.
En préparation, en avoir tracé sur Latis Pro, qui correspondent à la gamme de polarisation qu'on utilisera ensuite (important). Tracer à la main la droite de charge.

Tout faire en suivant le Maxi Fiches, avec les valeurs de Duffait. Prendre un générateur de tension à masse flottante. Ne pas dépasser $P_{\text{max}} = 0.1 \text{ W}$.

- 2 Sèche-cheveux : avec ce montage, le *point de polarisation* est sensible à β , donc aux conditions dans lesquelles est le transistor. On peut montrer en le chauffant que la polarisation change (en suivant I_c par exemple).

On a les caractéristiques. Il faut maintenant choisir un point de polarisation autour duquel les signaux alternatifs vont varier.

On choisit le montage de polarisation à émetteur commun. L'avantage est que le point de polarisation dépend peu de β , et qu'on a une seule alimentation.

Rq : pour décharger les capacités de découplage, on peut mettre momentanément l'oscilloscope en mode 50 ohms.

II - Amplification en régime variable : montage à émetteur commun

1 Circuit de polarisation

- Explications (juste l'idée).
- Vérification au multimètre, montrer sur le réseau de caractéristiques précédentes où on est.
- Sèche-cheveux : c'est stable.

2 Amplification des petits signaux

- Ajout de capacités de découplage. Il faut qu'elles laissent passer les signaux alternatifs, donc que $1/C\omega \ll R$, où R est l'impédance avec laquelle elles sont en parallèle : celle d'entrée, de sortie, ou R_E .
- Diagramme de Bode en amplitude en tension (on pourrait aussi le faire en courant, gain de $\sim \beta$ dans les deux cas). D'où la bande passante (à basse fréquence ça dépend surtout des capacités de découplage). (Dépend des composants, qui sont choisis en fonction de l'utilisation, ex. en musique.)
- Impédances d'entrée ($\sim 500 \Omega$, bien) et de sortie ($\sim 600 \Omega$, pas bon pour le HP).
- Distorsion (rapide).
- Rendement : on se place du point de vue du circuit de polarisation seulement. On fournit en tout $E^2/(R_c + R_e)$ et on utilise $(E/2)^2/R_c$, donc rendement de 25%.

Capacité en parallèle de C_e : mettre gros ($1000 \mu\text{F}$). Si ça ne marche pas, changer de transistor.

Si signaux déformés et asymétriques, il se peut que l'on ne soit pas à un bon point de polarisation (trop loin de $V_{ce} = 5 \text{ V}$).

En sortie du GBF, mettre de l'ordre de 30 mV. En sortie du montage, on doit avoir une tension de l'ordre de 1 V si on veut dépasser les tensions seuils de 0.6 V du montage push-pull.

III - Amplification de puissance et adaptation d'impédance

Faire son propre push-pull. Utiliser les transistors BD235 et BD236 (qui sont des darlington).

- **Idée du push-pull** (rapide)
- **Mesures**
 - Gain en tension (~ 1).
 - Gain en courant (multimètre RMS). Doit être de l'ordre de β .
 - Z_s et Z_e (\rightarrow c'est bien).
 - Rendement.
- Correction de la distorsion (avec les diodes, implique d'avoir fait son propre push-pull)
- **Chaîne complète** et musique.

Rq : étrangement, la déformation due au seuil dépend de la charge de sortie... mettre l'oscilloscope en 50 ohm.

MP 23 – Mise en forme, transport et détection de l'information

Interconnecter le plus de GBF possible pour moduler/démoduler des signaux.

MP 24 – Acquisition, analyse et traitement des signaux

Jury : dégager les notions d'erreur de quantification et de rapport signal sur bruit.

Plan

Bibliographie :

- Asch, acquisition de données, du capteur à l'ordinateur.
- Duffait, Électronique.
- Taillet, dictionnaire de la physique.
- BUP 804 : effet Doppler.

I - Acquisition : de l'analogique au numérique

1 Convertisseur double rampe

Faire 10 mesures pour voir ?

Vérifier la linéarité de la relation comptage-tension.

Discuter du pas de quantification (qui donne la résolution, plus petite grandeur d'entrée faisant varier la sortie) en fonction de f_{horloge} (même si on ne peut pas faire la manip car on ne contrôle pas cette fréquence si on prend un compteur tout fait). Ce pas de quantification est en partie à l'origine de l'erreur en ± 1 digit sur les voltmètres, il est aléatoire (on ajoute également \pm plus de digits si on prend en compte un offset dû à un mauvais calibrage).

L'incertitude usuelle supplémentaire est exprimée en % de la valeur totale mesurée, car elle résulte de non-linéarités dans la rampe par exemple (qui peut jouer ici aussi), de problèmes systématiques au départ de la rampe (offset), ... C'est donc en première estimation une erreur systématique, identique d'un appareil à l'autre.

Mettre un signal bruité.

Rq : manip du simple rampe plus simple, mais sensible au bruit et sensible à RC .

2 Échantillonneur bloqueur (boite toute prête).

Charge et décharge d'une capacité. Varier C .

Dire que l'on convertit chaque créneau en numérique à l'aide du CAN précédent.

Parler du nombre de bits, ...

On peut faire une TF et voir l'influence de la discrétisation.

Parler de l'erreur de quantification (Asch, Taillet) : $e(t) = x(t) - x_e(t)$, où x est le vrai signal et x_e le signal quantifié. Si le nombre de bit est infini, on a $e = 0$. S'il est fini, alors e peut être assimilé à un bruit. On définit le rapport signal sur bruit du convertisseur comme $x_{\text{rms}}/e_{\text{rms}}$. On peut le mesurer.

Mesurer le nombre de bits sur Latis pro : calibre +10/-10 et zoomer et mesurer l'incrément.

Rq : pour synchroniser des GBF, les relier par l'arrière et mettre un déclenchement externe.

Transition : comment faut-il échantillonner pour pouvoir exploiter le signal ?

II- Analyse de Fourier

1 **Fourier** : parler de $f_e > 2f_{\text{max}}$ et montrer les spectres identiques d'un signal à 100 Hz, 900 et 1100 Hz si on échantillonne à 1000 Hz. Parler de la résolution et faire un peu de quantitatif (Heisenberg par exemple).

Attention à Latis pro qui choisi parfois lui-même f_{ech} en désaccord avec ce qu'on lui dit, afin d'avoir un nombre de points puissance de deux.

2 Exemple sur la corde de Melde : on analyse un signal complexe en utilisant la TF. Faire plusieurs spectres sur plusieurs acquisitions et moyenner. Utiliser l'accéléromètre mis sur le pot vibrant (voir MP31, résonance, pour plus de détails).

Rq : attention au repliement de spectre (pas de filtre anti-repliement sur Latis Pro) : mettre un passe-bas analogique (le même que pour Doppler) ou bien justifier qu'on échantillonne assez haut (mais on a alors quand même un peu de bruit HF qui se replie dans le spectre étudié).

Rq : on peut aussi faire l'exemple des oscillateurs couplés (la chaîne avec quatre pendules couplés par ressorts), qui est plus simple. Dans ce cas, tracer la relation de dispersion (BUP 867) et comparer aux valeurs attendues pour bien montrer que ça marche quantitativement.

III- Traitement d'un signal par hétérodynage : effet Doppler

BUP 804.

On multiplie avec le circuit électronique (les multiplieurs), puis on filtre passe bas, ce qui est en fait un traitement en amont du signal.

Difficulté : il faut une fréquence d'échantillonnage grande, et aussi un temps long pour avoir la résolution nécessaire! donc énormément de points... D'où la technique de multiplication.

Rq : le filtre passe bas est essentiel pour respecter Shannon et éviter le repliement (contre lequel Latis Pro ne fait rien), car sans lui la composante à $f_1 + f_2$ apparaîtrait quelque part par repliement (l'illustrer?).

Le filtre a aussi pour effet de réduire le bruit, car alors le bruit HF (qui serait là par repliement) disparaît (et vu la multiplication, le bruit restant est en fait celui autour du signal original seulement).

Applications : vitesse des voitures, des étoiles, du sang dans les veines, ...

Conclusion et ouverture

On n'a pas parlé du capteur qui permet de faire l'acquisition des données : c'est aussi important.

MP 25 – Mesure de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Dictionnaire de physique (Taillet).
- Duffait électronique (fréquence-mètre, moteur CC, tout sur l'analyse de Fourier).
- BUP 867 : oscillateurs couplés.
- BUP 804 : effet Doppler.

Introduction

Définir une fréquence (Taillet). Parler de la mesure du temps actuelle : période étalon (césium 133) via un dispositif qui fournit un créneau de fréquence fixe (horloge atomique très présente dans les labos). Axer sur les techniques de mesure.

I - Mesure par stroboscopie

Corde de Melde en régime forcé. Tracé de la droite, remonter à c .

Transition : passons à des mesures numériques.

II - Principe du fréquencemètre par comptage

Duffait.

D'abord caractériser le montage au GBF, par ex. entre 10 et 2000 Hz. Donner l'erreur ($\sim 1\%$). GBF en TTL 0-5 V.

Avec le diapason (le gros à 288 Hz) : montage micro + amplificateur + AO comparateur et diode + pont diviseur pour ramener à 5 V.

Faire 10 mesures pour voir.

III - Analyse de Fourier

Duffait.

1 Principe

Sur un signal du GBF, montrer le repliement, la résolution, ...

2 Application

Au choix selon le temps : test sur le diapason (et comparer à la mesure précédente).

OU

Corde de Melde et l'analyse des modes propres. Moyenner plusieurs spectres pour réduire le bruit (c'est d'ailleurs ce que fait un analyseur de spectre). Voir montage 31 résonance pour des détails.

OU

Oscillateurs couplés (chaîne avec quatre pendules couplés par ressorts). Dans ce cas, tracer la relation de dispersion (BUP 867) et comparer aux valeurs attendues pour bien montrer que ça marche quantitativement.

IV - Mesure de faibles écarts fréquentiels : hétérodynage

Effet Doppler et détection hétérodyne (voir montage Analyse et traitement d'un signal).

Remonter à la vitesse du son (Handbook).

Applications : vitesse des voitures, des étoiles, du sang dans les veines, ...

Remarques

Critère de Shannon : il n'y a *aucune* perte d'information entre un signal échantillonné à $f_{\text{ech}} \geq 2f_{\text{max}}$ et le signal réel, même à la limite où $f_{\text{ech}} = 2f_{\text{max}}$, à condition que le signal échantillonné soit reconstruit en convoluant avec un sinus cardinal. Ce que ne fait pas un logiciel de type Latis Pro ou Synchronie. C'est en revanche effectué par les oscilloscopes.

Les compteurs marchent probablement à base de bascules JK, puis de convertisseurs vers les afficheurs.

MP 26 – Mesure de longueurs

Plan

Bibliographie :

- Duffait, Électronique.
- Cap Prépa PC : Michelson.
- Taillet, Handbook.
- Ashcroft : détails pour Debye Sherrer.

I - Par mesure de parallaxe

L'horizontalité des goniomètres n'est pas critique. La précision de la mesure de l'angle l'est beaucoup plus.

Viser pour aligner les deux réticules, en éclairant l'un avec une QI et un dépoli, pour bien repérer l'axe lunette-lunette. Relever les angles. Ensuite, viser une même verticale au loin. A priori les deux ne viseront pas le même point (pas à la même hauteur). Jouer un peu sur le support (cale sous un des pieds) pour arranger ça, sans que ça ne désaligne trop l'alignement des lunettes. Si les points visés ne sont pas les mêmes, c'est qu'on confond en fait la distance à ces points, ce qui ne fait pas une grande différence comparé à ce qu'induit l'incertitude sur les angles.

Indiquer les distances mesurables en astrophysique (objet à un parsec, par définition ! voir Taillet). Les incertitudes sont en $\delta h/h \propto (h/D)$, où h est la distance mesurée et D celle entre les goniomètres : elle est très grande si h est grand.

5% d'incertitude pour $\delta\alpha = 1'$ dans un amphi, soit bien 15% au total.

II - Télémétrie acoustique

Faire une droite d'étalonnage et confirmer la vitesse du son.

L'émetteur est modélisable par un filtre passe bande du second ordre très sélectif, donc avec un temps d'amortissement long, d'où des oscillations. Envoyer des pulses composés d'une trentaine d'oscillations, et mesurer entre la fin de l'émission et le début de la décroissance exponentielle du signal reçu.

Idem que télémétrie laser (distance Terre-Lune par exemple, grâce aux réflecteurs posés sur la Lune par les américains). Trouver le télémètre de la collection.

III - Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre à l'aide de l'interféromètre de Michelson

Montage avec les cannelures². Prendre les lames de verre avec notice et indices tabulés. Prendre le Spectromètre HR4000 (plus précis), et mesurer entre 590 et 660 nm.

2. Le montage où l'on repère de combien a bougé la frange achromatique avec en parallèle un laser pour avoir la distance chariotée est lourde (moteur, laser, ...) et tricky car sans la lame on repère bien l'ordre 0, mais avec la lame l'ordre 0 n'existe plus ($n(\lambda)$ dans la lame), et la frange centrale que l'on observe est une frange achromatique (et non pas l'ordre 0). Elle correspond à $dp/d\lambda = 0$, soit une différence de $2B/\lambda_0^2$ par rapport à la formule naïve qui dit que $d = e(n-1)$, soit une erreur de 5% environ (voir Cap Prépa PC, chapitre sur le Michelson). Ou alors il faut le prendre en compte, et c'est encore plus lourd...

En coin d'air et lumière blanche. On place le spectromètre sur la frange centrale. On place la lame de verre dans un des bras : les cannelures apparaissent sur le spectre.

On peut relever le λ d'une dizaine de pics, tracer une droite et remonter à n . Cependant, ceci impose de supposer n indépendant de λ , ce qui mène à une erreur de l'ordre de 5% sur le résultat final (faire l'application numérique, la propagation des erreurs n'étant pas évidente).

Au final, il vaut mieux exploiter deux cannelures seulement avec les valeurs précises de $n(\lambda)$ prises dans la notice.

IV - Mesures microscopiques : diffraction d'électrons

Tracer la courbe donnant le rayon des anneaux en fonction de la tension imposée. La pente donne la distance entre plans de Bragg, qui doit correspondre à ce que donne la notice.

Pour la méthode des poudres, voir Aschroft.

Remarques

Les incertitudes sur les fonctions trigonométriques s'expriment avec des radians, et pas avec des degrés. On a en effet $\sin x \sim x$ pour x en radian seulement. C'est l'unité de définition des fonctions trigonométriques.

Pour des ordres de grandeurs sur la méthodes de la parallaxe, on peut voir Panorama de la physique. Cette méthode permet de déterminer des distances jusqu'à 90 pc (diamètre de la galaxie : 30 kpc). Au delà, il faut utiliser d'autres méthodes basées sur des chandelles standards (céphéides, galaxies spirales, SN Ia).

MP 27 – Systèmes bouclés

Plan

Bibliographie :

- Précis Bréal électronique et Granjon (pour la théorie des systèmes bouclés).
- Duffait électronique.
- Krob électronique (oscillateur de Wien).
- Cap Prépa première et deuxième année.

Introduction

Asservissement : insister sur les notions de stabilité, temps de réponse, et précision. Nécessité d'asservir car on ne connaît pas ce qui va perturber le système (Granjon).

Oscillateurs : insister sur la condition d'oscillation, en phase et en amplitude.

I- Moteur asservi en position

Duffait.

Attention à brancher le moteur dans le bon sens (sinon instable).

Si l'erreur statique n'est pas nulle, changer l'offset de l'AO comparateur (ce qui se comprend aisément : on a $v_m = k(v_e - v_s - v_{\text{offset}})$).

Points importants : compromis entre dépassement et temps de montée/couple fort/précision.

- Raisonner avec B_m (qui est $\propto A_v$) et τ_m (caractérise le moteur, ne peut pas changer) et la FTBOuverte, au lieu de m et ω_0 directement.
- On veut un grand B_m (un grand $\omega_0^2 = B_m/\tau_m$ pour la FTBF) pour avoir un couple fort et un système précis. Il faut donc un grand A_v .
- Mais alors $m = 1/(2\sqrt{B_m\tau_m})$ diminue et donc le dépassement augmente. Le montrer. On a d'ailleurs $B_m \times m = 1/(2\tau_m)$ indépendant de B_m ! d'où le compromis.
- La solution est d'ajouter le correcteur à avance de phase, qui change τ_m en τ_2 . Ainsi, B_m peut rester grand, et on peut indépendamment augmenter $m' = 1/2\sqrt{B_m\tau_2}$. En fait, on sort d'un $B_m \times m$ indépendant de l'électronique en augmentant l'ordre du système.
- Finalement, c'est la modélisation et sa vérification qui permet de choisir l'avanceur de phase et ses composants.

Attention pour le correcteur de phase, C_1 et C_2 se placent sur l'AO inverseur directement.

II - Oscillateur de Wien

Krob (mieux que Duffait).

Connaître le rôle des composants et des blocs.

III - Oscillateur à quartz

Montage quartz et Colpitts de l'ENS, Krob, exercice 13.4 du Cap Prépa PCSI (ancien programme).

- 1 **Étude en boucle ouverte** : fréquence de résonance, estimer le facteur de qualité. Utiliser des sondes pour l'oscilloscope (les capacités du montage sont trop faibles).

2 Fermer le circuit et mesurer la fréquence des oscillations.

Elle est légèrement différente de celle de résonance en boucle ouverte, car l'impédance d'entrée de la partie transistor n'est pas très grande, et change donc la FTBF (qui est différente de $1/(1 + FTBO)$). Voir Krob.

Conclusion et ouverture

Laser transparent, spectre sur le coté et devant : la cavité de Fabry-Perot sélectionne des modes et a le même rôle que le résonateur d'un circuit électrique.

Remarques

Questions diverses

- A-t-on toujours le produit gain \times bande passante constant ? Non, c'est seulement pour un système d'ordre 1 contre-réactionné (voir leçon 21, Rétroactions et oscillations).
- Pourquoi une fonction de transfert du 2nd ordre pour le moteur ? Cela vient du modèle. Par exemple si on ne néglige plus l'inductance de l'induit, on a un ordre 3.

Oscillateur à quartz

Voir MP31, résonance, pour la physique du quartz lui-même.

Le montage est un oscillateur de Colpitts, où l'inductance est remplacée par le quartz. Le quartz peut être modélisé par une capacité en parallèle avec R+L+C. Il se comporte de façon inductive dans une faible bande de fréquence $f_s - f_p$, qui est là où les oscillations peuvent avoir lieu. On a $(f_s - f_p)/f_s \sim 1/200$. La résistance finie entraîne un facteur de qualité fini, mais grand (10^6), qui fait que la fréquence sélectionnée est précise (plus qu'au 1/200ème). De plus, la fréquence est grande, ce qui permet une bonne précision pour des mesures de temps (et nécessite d'utiliser le transistor car un AO ne suit pas à ces fréquences).

L'emploi de sondes minimise l'influence des mesures, mais ne l'annule pas. Mettre une sonde bien accordée revient en effet à changer la fonction de transfert oscilloscope+cable en $H = 1$, mais les fonctions de transfert se multiplient entre elles seulement si les impédances d'entrées sont bien adaptées. Lorsque ce n'est pas le cas, on perturbe le système. Ici ça peut se voir en mesurant avec une sonde en voie 1, et en voie 2, et en regardant évoluer la voie 1 quand on débranche la 2.

La fonction de transfert du système de Colpitt avec deux capacités et une inductance est du deuxième ordre. Avec un quartz jouant le rôle de L , on a un $L(\omega)$, et l'ordre est supérieur à 2. On n'a donc aucune raison d'avoir la résonance à déphasage nul. C'est pourtant un déphasage nul qui autorise les oscillations (critère d'oscillations de Barkhausen). En pratique, il ce déphasage nul a lieu proche de la résonance.

L'amplificateur est un montage transistor à charge répartie (Duffait p. 124). L'émetteur n'est pas au commun (à la masse). Dans le cas où le transistor C_E est complètement court-circuité, le gain est faible mais indépendant des caractéristiques du transistor, et le signal n'est donc pas déformé. Si C_E n'est pas court-circuité, le gain est plus grand mais les signaux déformés. Ici le potentiomètre permet de choisir des cas intermédiaires.

Dans une montre à quartz le quartz est taillé en forme de diapason (même raisons que pour un diapason : éliminer les harmoniques les plus basses, vibrer par la base, cf p. 149). Taille : 4 mm par 0.2 mm, fréquence propre de l'ordre de 32 kHz (voir La physique par les objets du quotidien).

MP 28 – Instabilités et phénomènes non-linéaires

Plan

Bibliographie :

- Krob : Van der Pol, Portelli : théorie sur VdP.
- Bergé, L'ordre dans le chaos.
- Strogatz : au cas où.
- BUP 867 : oscillateurs.
- BUP 741 : balle de ping pong.

I - Pendule pesant aux grands angles

1 Calibration

Linéarité du capteur (on s'intéresse à l'amplitude ici), équilibrage du pendule, moment d'inertie.

2 Formule de Borda

Isochronisme, puis plus à grande amplitude. Montrer qu'on a la formule de Borda.

3 Génération d'harmoniques

FFT d'un enregistrement à grand angle.

4 Portrait de phase, éventuellement (on en fait un après sur VdP).

II - Oscillateur de Van der Pol

Motivation : l'équation de VdP décrit un système au départ harmonique, mais avec une source d'énergie dépendant de l'amplitude, de sorte à faire saturer les oscillations (s'il y en a). Elle décrit une bifurcation de Hopf, qu'on retrouve dans d'autres systèmes (les allées de Von Karman par exemple).

Le circuit électrique permet de réaliser cette équation, et donc de l'étudier.

1 Caractérisation de l'élément NL

Fit en XY sous Latis pro. Puis on n'y touche plus.

2 Nature du cycle limite

Portrait de phase et nature du cycle limite.

3 Diagramme de bifurcation

Faibles écarts au seuil. Tracer l'amplitude en fonction de l'écart au seuil : bifurcation de Hopf (voir Bergé).

On mesure au voltmètre. Attention, la formule théorique donne une amplitude $A = 2s_0$, i.e., le signal est $A \cos(\omega t)$. Le voltmètre mesure $A/\sqrt{2}$.

4 Régime fortement non-linéaire

Mesure de la période des oscillations de relaxation.

III - Balle de ping-pong

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00210343> et BUP 741 (Vol 86, février 1992).

Pot vibrant et balle de ping-pong, avec support avec accéléromètre.

Se placer à f fixe (20 Hz), et varier l'amplitude pour constater que l'on peut avoir une période simple, une double, ou le chaos.

On peut faire l'acquisition avec Latis pro, et avec la fonction seuil calculer les temps entre les impacts. On voit alors qu'on a toujours le même, une alternance entre deux, ou quelque chose d'irrégulier. Utiliser seuil sur la valeur absolue du signal.

- Tracer T_1 et T_2 en fonction de l'amplitude du pot : on obtient un diagramme fourche (sous critique ?).

- Tracer des sections de Poincaré (des coupes dans l'espace des phases : en fait on a des variables bizarres donc pas vraiment) : on trace le temps entre impacts en fonction de l'amplitude du pot vibrant lors de l'impact (c'est donc une coupe sur la surface $z_{\text{balle}} = z_{\text{pot}}$). Pour ça, sous Latis pro, on définit cette amplitude comme $\sin(\text{temps d'impact} \times f)$. Il faut synchroniser ce sinus sur le signal de l'accéléromètre en ajustant sa phase. Faire une section pour un régime simple, un double, et un chaotique.

On peut aussi tracer le temps d'impact $n + 1$ en fonction du temps d'impact n , ...

Rq : L'espace des phases est à trois dimension : pour caractériser le système il faut altitude et vitesse de la balle, et position du plateau du pot vibrant. On peut donc être chaotique.

Remarques

Élément non-linéaire et Van der Pol

Équation de l'élément non-linéaire : il faut reconnaître le montage soustracteur à AO. Choix des résistances : pas trop faibles pour que les AO ne saturent pas en courant, mais petites devant les impédances d'entrée des AO.

Équation du circuit de VdP : reconnaître deux intégrateurs et un inverseur (à condition d'enlever R_{C1} , NL et R_{NL}). On a donc un oscillateur harmonique. Si on ajoute R_{C1} : dissipation. On voit donc que l'élément NL va jouer un rôle similaire à R_{C1} , en permettant en plus d'être une résistance négative. Pour réellement établir l'équation, il faut faire une loi des mailles sur l'entrée V_- du premier AO.

MP 31 – Résonance

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Taillet Dictionnaire de la physique.
- Cap Prépa PCSI : rappels sur le RLC.
- Duffait, Quaranta.

Introduction

Définition de résonance (Taillet). Voir remarques dans la leçon correspondante (LP47).

I - Résonances à faible facteur de qualité

1 Un degré de liberté, circuit RLC (avec suiveur pour s'affranchir de la résistance du GBF).

On trace $f_{\text{résonance}}$ en fonction de C et la pente donne L . C'est le principe des vieux RLC-mètre.

Faire une mesure de Q .

On fait un lien entre Q mesuré comme la largeur dans le diagramme de Bode et la durée du transitoire mesurée entre deux pics (incrément logarithmique, cf Cap Prépa par exemple), pour plusieurs R : tracer une droite.

Évoquer la résonance en tension.

2 Deux degrés de libertés, RLC couplés capacitivement, Quaranta (en fait non, faire plutôt les quatre pendules couplés par ressort).

Forcer les oscillateurs en sinusoïdal wobbulé, pour directement voir les résonances.

Tracer quelque chose.

3 Quatre degrés de libertés : les pendules couplés par ressort

Modes propres avec vidéocom, puis forcer la chaîne de pendules avec un pot vibrant aux fréquences propres : on a résonance et on visualise les différents modes. Les fréquences de résonance sont bien les mêmes que les fréquences propres.

4 Infinité de degrés de liberté, corde de Melde.

Régime forcé. Stroboscope. Comparer c à la théorie (peser la corde).

Régime libre : ne plus alimenter le pot vibrant, mais s'en servir pour acquérir sur l'ordinateur, ou mieux, visser un accéléromètre piézoélectrique sur le pot. Faire une TF (en moyennant plusieurs si bruit). On trouve ainsi les modes propres : ce sont les mêmes que les fréquences propres. Peut aussi marcher directement à l'oscilloscope (et être plus rapide).

Attention à l'interprétation. On attache un bout de la corde au pot vibrant, donc la CL n'est plus stricte. Tout se passe en fait comme si on était relié à un autre milieu, d'impédance très grande devant celle de la corde (comme si on avait attaché une autre corde par exemple, mais très lourde). On n'est donc pas très loin du cas CL stricte du point de vue de la corde, mais on transmet un peu d'énergie de l'autre côté, ce qui permet de faire vibrer le pot et d'avoir notre signal. Cet exercice est traité dans Garing, Ondes mécaniques et diffusion. De plus, on mesure la vitesse.

Message : nombre infini de degrés de liberté, et donc de modes propres, leurs fréquences étant celles de résonances.

II - Résonances plus marquées

1 Quartz

Mesurer Q en boucle ouverte. Voir MP 27 (p. 254) pour une discussion.

Rq : comme Q est très élevé, le transitoire est très long (beaucoup d'oscillations), mais on s'en fiche.

2 Cavité Fabry-Pérot (facultatif, probablement pas le temps).

But : outils d'analyse. Dans un laser, but : sélection en fréquence.

Si cavité Fabry-Perot : souligner que l'approche est inverse par rapport à la corde de Melde : pour la corde on a une longueur fixe et on varie l'excitation ; pour la cavité on a une excitation fixe et on varie la taille de la cavité. Bien faire chauffer avant.

Duffait (avec la même cavité que nous), et notice. Dangoisse. A propos du FSR de 2 GHz : il faut résonner en fréquence. Pour une fréquence en entrée à ν , les d (épaisseur de la cavité) telles qu'on ait quelque chose vérifient $\nu = k \times c/(4d)$ avec k entier. Quand d varie, on a donc plusieurs pics. La séparation entre deux pics correspond donc, en fréquence, à $c/(4d) = 2 \text{ GHz}$ pour cette cavité (car $d = 3.7 \text{ cm}$ avec une extension de 480 nm). (En longueur d'onde, ça signifie que la longueur a variée de $\lambda/4$.)

Avec des règles de trois, on peut remonter à l'espacement en fréquence entre deux pics. Or la cavité du laser laisse passer des modes tels que $\nu_n = nc/(2L)$, d'où l'on déduit L (qq cm).

On mesure aussi la largeur à mi-hauteur d'une raie, et on en déduit le facteur de qualité $Q = \Delta\nu/\nu$ et la finesse de la cavité (voir notice et Dangoisse). On trouve $4 \times 10^{14} \text{ Hz}/10 \text{ MHz} = 3 \times 10^7$ pour la cavité, et plus pour le laser (donc on ne peut pas le mesurer pour le laser, c'est la cavité qui limite).

Conclusion

Effets bénéfiques (quartz, cavité laser), utile pour mesurer (cavité FP), effets néfastes (destruction), et très général. Ouvrir sur la résonance paramétrique.

Remarques

Quartz

BUPs 799 et 879.

Un quartz est un matériau piézoélectrique : génération d'une polarisation électrique, et donc d'une ddp à ses bornes, lors de l'application d'une contrainte mécanique, et vice-versa (voir leçon sur les diélectriques, LP 27, p. 101).

Le bloc de quartz taillé possède aussi une fréquence de résonance mécanique (des modes propres de vibration). Dans le circuit électrique, lorsqu'il est excité par une ddp, il va se déformer, puis relaxer lorsque l'excitation s'annule et donc générer une ddp. Il se comporte donc un peu comme un condensateur/bobine. Si le forçage électrique est à la bonne fréquence, il y a résonance.

Avec la manip de l'ENS, on mesure autour de 70 V à la résonance.

Le schéma électrique équivalent d'un quartz est un condensateur C_0 en parallèle avec un condensateur + une bobine + une résistance. Ceci est discuté dans le BUP 990 p. 40. En particulier il y est montré que la capacité C_0 est une vraie capacité (celle formée par les armatures du quartz), alors que R , L et C en série à côté n'ont rien de composants électroniques. Leurs expressions fait intervenir les grandeurs mécaniques du matériau. D'ailleurs l'ingrédient physique

essentiel est un échange d'énergie entre les forme électrique et mécanique, et certainement pas électrique et magnétique comme pourrait le laisser entendre le circuit électrique équivalent. Il s'agit donc juste d'une analogie permise par la forme de l'équation. Il y a des valeurs dans le BUP 990.

Voir MP27 (p. 254), systèmes bouclés, pour des remarques sur le montage électrique de l'oscillateur à quartz.

Résonance paramétrique

Il s'agit d'une résonance produite par la variation d'un des paramètres du système, et non pas par un forçage. Par exemple : $x'' + a(t)x' + \omega^2(t)x = 0$ est un système paramétré : la pulsation propre et l'amortissement varient indépendamment de la variable x . En général, si ω varie à une fréquence double autour de la fréquence propre du système, il y a résonance.

C'est parait-il le cas de la balançoire (lorsqu'on augmente l'amplitude du mouvement en tendant-pliant les jambes).

MP 32 – Couplage des oscillateurs

Jury :

Couplage inductif : on ne maîtrise pas la constante de couplage... Non-linéaire, accrochage de fréquence. Étude de la phase : apporte des informations complémentaires. Ne pas se restreindre à des oscillateurs identiques. On peut étudier des oscillateurs à plus de deux degrés de liberté.

Plan

Bibliographie :

- Quaranta I et III.
- BUP 867 : pendules couplés.

Introduction

Messages : Modes propres et degrés de liberté. Couplage maximal si oscillateurs identiques.

I - Deux pendules couplés : modes et transfert d'énergie

BFR mécanique 2, Quaranta I.

Pendules couplés par fil de torsion.

- 1 Modes symétrique et antisymétrique**, tracer en fonction de l et remonter à la constante de couplage. Confirmer la constante de couplage par une mesure avec un pendule fixé.
- 2 Étude énergétique**
Tracer E_p , E_c , E_m (qui ne doit jamais augmenter, sinon ajuster les constantes...). Insister sur le transfert d'énergie.
- 3 Pendules non accordés** : désaccorder les pendules, montrer que les battements sont moins francs.

Transition : on va maintenant faire varier la force du couplage. Plus pratique en électricité. Mais c'est les mêmes équations. On va également forcer le système.

II - Influence de la constante de couplage : couplage capacitif de deux RLC

Quaranta III.

Ici aussi, influence des fréquences propres. Faire le lien avec le précédent (même type de couplage : capacitif).

- 1 Accorder les oscillateurs** : suivre QIII. On travaille avec les mêmes oscillateurs. Repérer f_0 .
- 2 Modes propres en régime libre**
Coupler les oscillateurs en mode asymétrique. Mesurer ω_+ et ω_- en fonction de la capacité de couplage Γ . Remonter à ω_0 et C .
Rq : en fait si on compare i_1 et i_2 , on voit que ce n'est pas tout à fait pareil.
- 3 Forçage et résonance**
Forcer les oscillateurs. Wobbuler un GBF par un autre GBF (plutôt que par une rampe de Latis pro qui n'est jamais conforme à ce qu'on lui demande), et placer un détecteur de crête. Montrer que les fréquences de résonance sont les mêmes que les fréquences propres (on a un facteur de qualité de l'ordre de 50, donc c'est bien le cas).

III - Couplage avec plus de degrés de liberté

Chaîne de 4 pendules avec ressorts. Relation dans le BUP 867.

Montrer qu'il y a autant de modes propres que de pendules.

Relation de dispersion $\omega_{n,p} = a \sin(p\pi t / (2(n+1)))$ avec n le nombre de pendules et p l'indice du mode. Le faire en bloquant 0 pendule, puis 1, puis 2, ... Remonter à ω_0 et ω_1 .

ATTENTION : Régressi est en degrés (ou pas selon l'option...)

Enfin, forcer la chaîne de pendule avec un pot vibrant aux fréquences propres : on a résonance et on visualise les différents modes.

Conclusion et ouverture

Vers la propagation d'onde.

Remarques

Voir montage résonance pour des remarques sur modes propres, fréquences de résonance, etc...

Donner des OG ou des valeurs exactes des facteurs de qualité.

Rq : on n'étudie que des couplages élastiques ici (couplage proportionnel à x), et non pas inertiel (couplage proportionnel à x'').

Influence du frottement sur la TF ? Multiplication par une enveloppe décroissante $f(t)$ (soit exponentielle, soit linéaire), donc la TF est la convolution de $\delta(\omega - \omega_0)$ et de $f(\omega)$.

MP 33 – Régimes transitoires

Plan

Bibliographie :

- Handbook, Taillet Dictionnaire de la physique.
- Cap Prépa PCSI : rappels sur le RLC.
- Duffait Électronique, Quaranta (régimes transitoires).
- Calecki, exercices de thermodynamique : théorie pour la diffusion du glycérol.

Introduction

Définir un régime transitoire (Taillet). Bénéfique (pour un amortisseur par exemple) ou pas (lenteur de réponse). Permet de caractériser complètement un système linéaire.

I - Les différents types de transitoires d'un système linéaire d'ordre 2

On étudie le cas des systèmes linéaires d'ordre 2. Motivation : de nombreux systèmes se modélisent ainsi. Seul l'équation importe, donc on en choisi un facile à étudier : le circuit RLC.

Quaranta (à régime transitoire) et Duffait. Mettre un montage suiveur avant le GBF pour ne pas prendre en compte la résistance interne du GBF.

Le type de régime dépend de Q (par rapport à $1/2$).

1 Régime pseudo-périodique

Tracer $\omega = f(R)$ et en déduire $\omega_0 = \omega(R = 0)$.

2 Régime critique

Trouver R_c et en déduire L et C .

3 Régime amorti

II - Réponse indicielle d'un système linéaire

La réponse à un échelon permet de caractériser complètement un système linéaire.

1 Et encore le circuit RLC

La réponse à un échelon permet de caractériser complètement le système (s'il est linéaire).

Faire une acquisition longue, la dériver, faire la TF en amplitude et en phase. Identifier la résonance : maximum d'amplitude et déphasage nul. (Attention, la pulsation de résonance n'est pas la pseudo-pulsation de tout à l'heure.)

Lien entre Q et temps d'amortissement.

III - Régime transitoire de type diffusif

Diffusion du glycérol dans l'eau.

Discuter l'approximation sur l'indice. Attention à la sur-représentation des points (on en a plein à t petit). On prend un mélange 50/50 eau/glycérol, qui diffuse dans de l'eau. Le coefficient de diffusion de Quaranta est le bon pour ce mélange ci (cf compte-rendu pendant l'année et lien vers l'article scientifique). Attention au piège pour la mesure de la hauteur : c'est par rapport à la verticale passant par le maximum à $t = 0$, et non pas par rapport au maximum.

IV - Établissement d'un régime sinusoïdal forcé

1 Circuit RLC

Mettre en évidence le fait que la solution est la somme d'une solution particulière (le régime forcé, oscillant à f), et de la solution de l'équation homogène (le régime transitoire, à $f_0 = 1/\sqrt{LC}$).

Pour $f_0 = 5.4$ kHz, prendre $f = 15$ kHz et R petit, puis $f = 5$ kHz et $R = 0$ (dans ce dernier cas, mesurer la période des battements, qui est $f - f_0$).

On peut même essayer de fitter la solution en régime permanent, et la soustraire au signal total, pour obtenir le transitoire seul.

2 Oscillateur de Wien, Krob.

Temps de croissance du signal lors de l'établissement du régime oscillant, croissance en $\tau \propto |R - R_c|^\alpha$, α exposant critique (1 ici). Remonter à $R_c = 2R_1$. Pente de la droite à exploiter ?

Conclusion et ouverture

Temps de réponse d'une photodiode et d'une photorésistance.

Autre : Redresseur alternatif-continu : illustre l'importance d'un transitoire long pour redresser une tension alternative.

Chapitre 11

Leçons de chimie

LC 1 – Chimie et couleur (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS : couleurs.
- Microméga 1ère S : Beer-Lambert, couleurs.
- Grecias PCSI nouveau programme.

Manips :

- Synthèse de la phénolphtaléine (JFLM2).
- Bleu de patenté et menthe (Microméga TS).
Montrer du jaune et du bleu, les superposer : c'est vert !
Faire le spectre de la menthe, et des deux colorants.
Faire le dosage par étalonnage.
- Titrage colorimétrique : vinaigre (phénolphtaléine) (JFLM).

Introduction

- La chimie s'applique au quotidien.
- Omniprésence dans la nature (les carottes, les feuilles des arbres).
- Importance industrielle des colorants : tissus (les jeans avec l'indigo), produit alimentaires (sirop de menthe, bonbons). Voir JFLM2.
- Outre ce côté esthétique, on peut pour un produit donné remonter à sa composition en analysant sa "couleur".
- Exploitation des changements de couleurs pour les indicateurs colorés, papier pH.

Buts : comprendre pourquoi la couleur, l'utiliser pour caractériser des produits, l'utiliser pour repérer une équivalence.

On se restreint surtout aux composés organiques (attention à vraiment le faire).

I - Origine de la couleur dans les composés organiques

1 Couleur perçue et absorbance (Hachette TS, Microméga 1ère S).

$A = \log(I_0/I_t)$, roue des couleurs, couleur perçue.

On se sert de A quantitativement dans le II.

2 Lien avec la structure chimique

Groupements chromophores (les doubles liaisons), auxochromes.

3 Synthèse d'un colorant : la phénolphtaléine.

Manip : JFLM 2. Caractériser en comparant au spectre du produit commercial.

Rq : la phénolphtaléine a été classé CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) récemment.
Dire qu'on ne l'utiliserait pas en lycée.

Faire le spectre visible.

II - Caractérisation et contrôle par spectrophotométrie

1 Principe du spectrophotomètre, loi de Beer-Lambert

Donner les conditions pour Beer-Lambert.

2 Les colorants du sirop de menthe : **manip**

Microméga, aussi ex. de courbe dans le TS Hachette (contrôles de qualité par dosages).
Parler des colorants alimentaires, exemples.

3 Dosage d'un colorant du sirop de menthe : **manip**

Comparer à la dose journalière admissible (DJA).

III - Indicateurs colorés

But : exploiter le fait que certaines espèces changent de forme selon, par exemple, le pH, ces formes ayant différentes couleurs.

1 Indicateurs colorés pH-métrique

Définition, conditions d'utilisation (cf JFLM1).

Manip : titrage du vinaigre (phénolphtaléine) (ou aspirine (phénolphtaléine aussi)).

2 Indicateur colorés universels : papier pH, chou rouge.

Conclusion et ouverture

On peut parler de fluorescence.

Remarques

Colorant vs pigment

Colorant : soluble dans l'eau.

Pigment : non soluble. Utilisé en peinture par exemple, où ils restent en suspension. L'indigo est un pigment, et pour être appliqué sur les vêtements il doit être transformé en une forme soluble.

La couleur des feuilles des arbres

Vert à cause de la chlorophylle. À l'automne, plus de chlorophylle, et la couleur est celle de pigments de type carotène.

Solvatochromie

La longueur d'onde d'absorption principale d'un composé peut changer en fonction du solvant. Tout dépend de la stabilisation, par le solvant, de l'état fondamental et de l'état excité, qui peut être plus ou moins forte (par exemple si l'état fondamental a un moment dipolaire plus grand que l'état excité, et que le solvant est polaire, alors le niveau fondamental baissera plus que le niveau excité).

Cf épreuve B, 2013.

LC 2 – Séparations, purifications, contrôle de pureté (L)

Plan

Bibliographie :

- Tec&Doc PCSI, chapitre compétences expérimentales.
- JFLM2 : les manip.
- Hachette TS : au programme de TS, organigramme récapitulatif (chapitre Stratégie de synthèse organique).

Manips :

- Synthèse de l'ester de lavande au micro-onde, extraction, lavage, CCM, IR.
- Synthèse de l'aspirine, recristallisation, CCM, Kofler, IR.

Pré-requis :

- Estérification
- Solvants
- Solubilité
- Diagrammes binaires (au programme de Term. STL)
- Spectroscopie

Introduction

Synthèse organique ici. On obtient le produit, mais non isolé et non pur.

Ici, on réinvestit nos connaissances pour décrire et comprendre des méthodes de séparation / purification / contrôle de pureté. Nécessité de ces étapes.

I - Synthèse d'un liquide

Manip de l'ester de lavande au micro-onde. À faire au fur et à mesure de l'exposé.

1 Extraction du produit

Dire (et démontrer ?) que 3 extractions avec V sont plus efficaces qu'une avec $3V$.

2 Purification

Distillation. Mentionner les cas d'azéotropie. (on ne fait pas cette manip)

3 Contrôle de pureté

Présenter des techniques au choix (indice de réfraction, température d'ébullition).
Dont : faire un spectre IR avant/après purification.

II - Synthèse d'un solide

Manip de l'aspirine, où on montre la recristallisation et le test sur banc Kofler.

1 Extraction du produit

Filtration sur Buchner.

2 Purification

Par recristallisation.

3 Contrôle de pureté

Banc Kofler : mesurer T_{eb} avant et après recristallisation, si ça marche...

LC 3 – Polymères (L)

Plan

Bibliographie :

- Tec&Doc PC, Tout en un PC.
- 1ère STI2D STL Durandau (éventuellement Nathan Azan).
- JFLM2.

Manips :

- Le nylon (JFLM2).
- Propriétés thermiques (avec la valise de polymères) : bec bunsen, azote liquide.
- Création d'un gel (polyacrylamide) avec différents niveaux de réticulation (JFLM2).
- Tests de polymères (coule, flotte, ...).

Pré-requis : Estérification, mécanismes, ...

Introduction

Omniprésence dans la vie courante (plastiques, habits, verres, ...), dans la nature (cellulose et amidon, caoutchouc, protéines, ...).

I - Définitions et exemples

Polymère : ensemble de *macromolécules* (de tailles différentes) engendrées par la répétition d'une unité structurale.

1 Unité de répétition et degré de polymérisation

2 Structure primaire des chaînes : linéaire, ramifiée, réticulée.

Polymères greffés. Interactions entre macromolécules.

Ex. : vulcanisation du caoutchouc.

II - Synthèse des polymères

1 Polyaddition : mécanisme sur transparent avec les étapes (JFLM2).

2 Polycondensation. Manip : synthèse du nylon.

III - Relation structure-propriétés

1 Propriétés thermiques (livre 1ère STI2D et compléments Tec&Doc et Tout en un)

Thermodurcissables : durcissent si T augmente.

Thermoplastiques : ramollissent si T augmente, redurcissent si T diminue. Possèdent une température de transition vitreuse T_{vitreux} ; appelé élastomère si $T_{\text{amb}} > T_{\text{vitreux}}$ (manip avec l'azote).

2 Propriétés mécaniques

Plastiques durs : souvent réticulés.

Plastiques mous : souvent linéaires ou ramifiés (manip tirer sur un sac poubelle).

Élastomères : linéaires ou ramifiés, si $T_{\text{vitreux}} > T_{\text{amb}}$.

Rigide/souple et cassant/non-cassant.

3 Influence de la réticulation

Manip du polyacrylamide. Faire 3 béchers.

4 Identification (pour recyclage par exemple).

Cf livre 1ère STI2D et valise polymères.

Conclusion et ouverture

Propriétés modelables à loisir en changeant les monomères, en greffant d'autres polymères.

LC 4 – Chimie et développement durable (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS.
- Tec&Doc PCSI.
- Paul Arnaud, chimie organique.
- Technique de l'ingénieur, biocarburants, et chimie durable (pour des chiffres).

Manips :

- Synthèse du bio-diesel (transestérification) (JFLM).
- Synthèse de l'ester de poire au micro-onde (JFLM ou Daumarie).
- Électrode de Clark (principe : contrôler les rejets) (Tout en Un, Rouessac, notice).

Introduction

Définir les enjeux, et le développement durable.
Les principes de la chimie verte et les domaines d'actions (encadré "l'essentiel" du Hachette TS).
On va réinvestir nos connaissances pour ...

I - Des matières premières renouvelables

- 1 **Fossile vs renouvelable** de 1ère génération vs de 2nd génération.
- 2 **Exemple** : **Manip**, faire du bio-diesel.

II - L'importance du choix du solvant

- 1 **L'eau, les agro-solvants**
- 2 **CO₂ supercritique** pour faire des extractions (on peut le récupérer) (TS Hachette, Arnaud).
- 3 **Sans solvant** : la chalcone.

III - Économie d'atomes et d'énergie

- 1 **D'atomes** : définition de ua et de E.
Pour l'ester de poire : acide carboxylique, anhydride d'acide, chlorure d'acyle. Voir Tec&Doc PCSI p. 470, avec l'alcool isoamylique (banane/poire).
- 2 **D'énergie** : **manip**, synthèse de la poire au micro-onde.
(Attention, ce n'est pas évident que l'on économise de l'énergie, il faudrait comparer la consommation du micro-onde à celle d'un chauffe ballon.)
Faire la série de purification jusqu'à la fin du temps imparti.

Conclusion et ouverture

Retour sur les principes et sur ceux qu'on n'a pas abordés.
Contrôle des rejets : montrer l'électrode de Clark (**manip**).

Pendant la leçon, pour chaque exemple dire quels principes sont illustrés / sur quel domaine d'action.

Remarques

Dégradation des produits organiques jusqu'à minéralisation : transformation jusqu'à H_2O et CO_2 . (Voir aussi épreuve B 2013.)

Contrôle de pollution, en utilisant un capteur utilisé dans la leçon capteurs électrochimiques, qui est au programme de T STL http://www.education.gouv.fr/pid25535/bulletin_officiel.html?cid_bo=57629.

LC 5 – Synthèse inorganique (L)

Plan

Bibliographie :

- JFLM2.
- BUP 770 et Microméga Hatier TS spécialité.
- Hachette TS.
- Grecias MP pour l'ammoniac.

Manips :

- Synthèse du trioxalatoferate (JFLM2).
- Hydrométallurgie du zinc (BUP 770).

Introduction

Cadre : optimisation de synthèse dans le but du développement durable.

Synthèse industrielle VS synthèse au laboratoire (chimie fine). Parler d'environnement et d'énergie. De rendement. D'optimisation en général.

I - Synthèse du trioxalatoferate de potassium

Synthèse directe. Mélanger à chaud, mettre à cristalliser à froid, filtrer ; recristalliser, filtrer ; étuve pour sécher → rendement.

Chimie fine. Le ferrioxalate est utilisé pour mesurer des flux lumineux (rendement quantique connu).

II - Hydrométallurgie du zinc

Décrire les différentes étapes. En **manip**, montrer l'électrolyse uniquement. Souligner les étapes bonnes ou mauvaises environnementalement.

III - Synthèse de l'ammoniac

Suivre Grecias MP (mais se souvenir qu'on est au niveau lycée).

“Il faut insister sur les différentes étapes de la synthèse. Elles sont conditionnées par la réaction difficile qui est la formation de NH_3 à partir de N_2 et H_2 . Insister sur la nécessité de la catalyse, décrire le catalyseur et la catalyse hétérogène, en déduire la nécessité de se débarrasser du monoxyde de carbone qui est un poison pour ce catalyseur. Expliquer comment on se débarrasse de CO puis de CO_2 . Expliquer qualitativement le choix pour P et T ainsi que le temps de passage sur le catalyseur : tous ces choix résultent d'un compromis. Montrer le schéma d'une unité de production ainsi qu'une photographie d'une unité de production industrielle. Si on parle de l'utilisation de NH_3 dans l'industrie, il faut être concret et ne pas se contenter de citer 'explosif' ou 'engrais'.”

Remarques

Voir le programme de terminale STL, discipline *Sciences physiques et chimiques en laboratoire (spécialité)*, au §“Des synthèses inorganiques” : http://www.education.gouv.fr/pid25535/bulletin_officiel.html?cid_bo=57537. Notamment, les complexes sont abordés.

LC 6 – Stratégies en synthèse organique (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS : ester de groseille et coût, solvant, ...
- Belin TS nouveaux programmes : liaison peptidique.
- Chimie TS, Belin, Parisi, 2002 : estérification tube à essai.
- Paul Arnaud.
- Technique de l'ingénieur j5800 sur l'estérification.
- Grecias, Tec&Doc, PCSI nouveaux programmes.

Manips :

- Estérification en tubes à essai : influence de T (Chimie TS, Belin, Parisi, 2002 (vieux livre bleu)).
- Estérification avec Dean Stark (JFLM2).

Introduction

Arrive en conclusion du cours de chimie : on va voir comment faire les choses efficacement.

I - Optimisation d'une synthèse d'estérification

1 Influence de T et d'une catalyse acide

Manip : en tube à essais, avec et sans acide. (Chaud ou froid : ça donne le même rendement : faire uniquement avec ou sans catalyse). Aussi doser acide seul, et catalyseur seul. Bien utiliser l'acide sulfurique concentré, mettre en proportions stoechiométriques, verser dans de la glace avant de titrer.

2 Déplacement d'équilibre : Dean-Stark.

Manip : cf JFLM2 pour la poire avec Dean-Stark. Mesure du volume d'eau, calcul du rendement final, spectres IR à divers stades.

3 Changer les réactifs, notion d'économie d'atome

Acide carboxylique, anhydride d'acide, chlorure d'acyle. Voir Tec&Doc p. 470, avec l'alcool isoamylique (banane).

4 Coût, environnement

Montrer le livre de TS avec l'ester de groseille. Notion de coût, d'environnement, ...

II - Sélectivité d'une synthèse

Pour réaliser une synthèse à partir d'une molécule bifonctionnelle, il faut : soit utiliser des réactifs chimiosélectifs, soit protéger une des fonctions, faire réagir, puis déprotéger. On explore les deux cas ici.

1 **Chimio sélectivité**, choix des réactifs, ex. de la synthèse du paracétamol, où l'anhydride acétique réagit sur l'amine et non pas sur le groupement hydroxyde. (Hachette TS)

2 **Protection de fonction** : cas de la synthèse peptidique.

Voir livre Belin TS chimie nouveaux programmes.

3 **Application à l'aspartame**

Production industrielle par protection/déprotection. Voir Microméga ?

Remarques

Estérification

- L'eau n'est pas le solvant : son activité est sa concentration.
- Pour déplacer l'équilibre on peut utiliser un Dean-Stark (entraînement hétéroazéotropique de l'eau, ssi on utilise un solvant non-miscible avec l'eau et plus léger), ou une distillation fractionnée si l'ester est l'espèce la plus volatile.
- On catalyse avec un acide à anion non nucléophile (ex : sulfurique ou phosphorique ou paratoluènesulfonique) car un nucléophile remplacerait l'alcool et réagirait avec l'acide carboxylique.

Synthèse peptidique

Au programme de TS et de T STL (option CBSV). Capacité exigible dans le programme de TS : “extraire et exploiter des information sur la protection d'une fonction dans le cas de la synthèse peptidique”. <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/les-acides-amin%C3%A9s-et-la-synth%C3%A8se-peptidique>.

Pourquoi recréer des protéines ? Pour les comprendre. Et aussi pour les utiliser. Cette liaison intervient aussi pour faire de l'aspartame.

LC 7 – Dosages (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS.
- Grecias, Tec&Doc PCSI : incertitudes, définitions de titrage en retour, ...

Manips :

- Dosage du sirop de menthe par étalonnage (spectrophotométrique), TS chimie.
- Titration conductimétrique (explicitement au programme de STL : titrage par précipitation suivi par conductimétrie) et potentiométrique du sérum physiologique.
- Eau de Javel : titrage en retour par iodométrie, JFLM.

En TS, chapitre “dosages et contrôles qualité”. Il faut donner un fil conducteur axé sur cet aspect. Bien gérer les incertitudes.

Introduction

Une connaissance qualitative de la composition d'une solution / d'un produit ne suffit pas : tout est toxique, il suffit qu'il y en ait assez. Nécessité de disposer de méthodes permettant de contrôler la qualité / la quantité de tel ou tel composé.

On va aller du plus simple au plus compliqué (étalonnage, titrage direct, titrage indirect), avec à chaque fois des exemples illustrant le contrôle de la qualité d'un produit alimentaire, de santé, ou ménager. On montre différentes techniques.

I - Dosage par étalonnage

1 Principe

2 Dosage du sirop de menthe par étalonnage (spectrophotométrique).

Remonter à la quantité de colorant, comparer à la Dose Journalière Admissible (cf Hachette TS).

Discuter des incertitudes.

Mentionner d'autres possibilités : par conductimétrie, ...

Transition : c'est en fait rarement possible, car il faut que la quantité à mesurer traduise seule la variation d'un paramètre mesurable.

II - Dosage par titrage direct

1 Principe, définition

Il y a une réaction chimique qui consomme le réactif à doser.

Définir l'équivalence : mise en présence des réactifs titrant et titré en proportion stœchiométrique. Son repérage est souvent la source d'incertitude la plus importante.

Donner les conditions que doit remplir la réaction de titrage : rapide, totale, unique, équivalence repérable.

2 Titration sérum physiologique (par potentiométrie et conductimétrie)

ou du vinaigre (ph-métrie (i.e. potentiel) et conductimétrie, donc un peu pareil).

Comparer à la notice, discuter des incertitudes pour chacune des méthodes.

III - Dosage par titrage en retour

Au programme en STL.

L'eau de Javel par les ions iodures.

Conclusion et ouverture

Parler des méthodes qu'on n'a pas abordées : pH-métrie, polarimétrie (STL), réfractométrie (STL), ... et d'autres exemples importants (méthode de Winkler pour l'oxygène dans l'eau, ...).

LC 8 – Facteurs cinétiques (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS : le plan.
- Tec&Doc PCSI : rappels de catalyseurs, de Sn1 et d'estérification.
- Mesplède et Daumarie : manips.

Manips :

- Suivi spectrophotométrique de $2\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (Mesplède).
- Suivi conductimétrique de $\text{tBu}-\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{tBu}-\text{OH} + \text{Cl}^- + \text{H}^+$ (Daumarie, Blanchard).
- Eau oxygéné et catalyses.

Introduction

Il y a des réactions lentes et des rapides (acide/base, cf titrages colorimétriques).

Manip introductive : Hachette TS, Fe^{2+} (sel de Mohr acide) et acide oxalique (+ acidifié par acide sulfurique), dans deux béchers. Ajouter du KMnO_4 : rapide avec le fer, lent avec l'acide oxalique.

Buts : aborder la notion de vitesse d'une réaction, voir les facteurs qui permettent de la contrôler, voir des méthodes de suivi de l'avancement.

I- Facteurs cinétiques d'une réaction

1 Vitesse d'une réaction

Manip : suivi par absorbance sur ordinateur de $2\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (Mesplède manip 79).
Définition et mesure de $t_{1/2}$.

2 Concentration des réactifs

Avec la manip précédente mais deux concentrations différentes.
Explication avec l'animation de Microméga.

3 Température

Conductimétrie sur ordinateur, $\text{tBu}-\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{tBu}-\text{OH} + \text{Cl}^- + \text{H}^+$ Laisser longtemps pour bien avoir σ_∞ . Se mettre à calibre fixé.
Explication avec le mécanisme puis le tracé du profil réactionnel (au programme de STL).
Facteur 2 tous les 10 degrés ?

4 Solvant, exemple d'une Sn1 (voir Tec&Doc mécanismes compétitifs), explication avec le profil réactionnel modifié. Parler avec les mains du postulat de Hammond. Ne pas faire de manip, expliquer sur le cas de tBu, mais en milieu basique.

Transition : parfois compétition cinétique vs thermodynamique, ex. de l'ammoniac, où T trop élevé n'est pas possible. Et puis on ne gagne pas tant que ça avec T , d'où les catalyseurs.

II - Catalyseurs

1 Définition et principe

On change le profil réactionnel en introduisant de nouveaux intermédiaires réactionnels.
Exemple avec l'estérification catalysée en milieu acide : mécanisme (transparent) et profil.

2 Homogène (H_2O_2 et fer III) (Hachette TS)

Application : H_2O_2 comme désinfectant des plaies : action catalysée par le fer du sang.

3 Hétérogène (H_2O_2 et platine) (Hachette TS)

Application : pour les lentilles (toujours utilisé aujourd'hui), pot catalytique, synthèse de l'ammoniac.

4 Enzymatique (H_2O_2 et navet)

Application dans le vivant. Donner des chiffres : 10^6 fois plus rapide.

Conclusion et ouverture

Autres facteurs : la lumière. Sinon, on peut aussi jouer sur un déplacement d'équilibre (Dean Stark), changer les réactifs (chlorure d'acyle, anhydride), et autres techniques d'optimisation de synthèse.

Remarques

Pour la catalyse, il y a aussi l'exemple du cobalt (rose, vert et ça mousse, rose, Mesplède 82). Mais on ne peut pas vraiment le décomposer en mécanismes.

LC 9 – Caractérisations par spectroscopie en synthèse organique (L)

Plan

Bibliographie :

- TS Hachette, TS microméga, TS Sirius dans une moindre mesure.
- Tec&Doc PCSI.
- Rouessac.

Manips :

- Synthèse de la phénolphthaléine (JFLM2).
- Ester de poire au micro-onde (JFLM2).
- Logiciel Specamp.

Introduction

Prérequis : UV-visible et IR.

But ici : *caractériser* un produit pour contrôle de qualité, identification pollution, recherche, ...

Qu'est ce que la spectroscopie : on excite le système et on regarde la réponse. Notion de résonance : absorption ou réponse significative pour certaines fréquences seulement.

Hiérarchie des spectroscopies : UV, visible, IR, RMN, qui sondent des énergies de plus en plus faibles (donc plus précis). Loupe sur différentes parties, complémentarité. OG des longueurs d'ondes.

I - Spectroscopie UV-visible, caractérisation d'espèces

1 Synthèse de la phénolphthaléine (**manip**), puis caractérisation. JFLM2

Montrer le filtrage Buchner.

Spectre UV-visible fait en préparation, comparaison avec celle du labo.

II - Spectroscopie IR : vers l'intimité moléculaire

1 (**manip**) **synthèse au micro-onde** de la poire. Pas sur que l'eau soit bien partie, combien de temps faut-il faire chauffer ? Puissance ? → nécessité de caractériser le mélange réactionnel.

Faire le plus de spectres IR possibles (après la première séparation à l'eau, après la seconde, à la fin).

III - Résonance magnétique nucléaire : toujours plus proche

Définir résonance, magnétique, nucléaire. À part ça, suivre le Hachette TS.

Exemple de $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{O}-\text{CH}_3$ avec ses spectres IR et RMN sur Specamp.

Remarques

Cuisson au micro-onde

Finalement, avec les proportions de JFLM2 et deux gouttes d'acide sulfurique, une minute à 100 W suffit.

(Rq : Brûle plus facilement en catalysant avec de l'acide sulfurique par rapport au para-toluène sulfonique.)

Liaison d'ester

Pourquoi les liaisons C=O des esters ont-elles un σ plus grand que celles des acides carboxyliques ?

$\sigma \propto E$ vaut $\sqrt{k/m}$. k est en fait plus grand car pour les esters, le groupement alkyle (qui est un H dans les acides) est électrodonneur, et donc renforce la densité électronique au voisinage de la liaison double aussi, d'où un k plus grand.

LC 10 – Relation structure réactivité en chimie organique (L)

Plan

Bibliographie :

- Tec&Doc PCSI, chap. Activation de groupe caractéristique (centré sur les alcools), chap. Oxydoréduction.
- Tec&Doc PC, chap. 16 Oxydation (cas des alcènes), et chap. AdN+E (estérification et acylation).
- Paul Arnaud, Chimie organique.

Manips :

- Test de Lucas sur la classe des alcool (JFLM2).
- Oxydation ménagée par le permanganate (JFLM2).
- Réactivité à l'acylation en fonction de l'isomérisation de constitution du nitrophénol (JFLM2).

Introduction

Illustration, à travers l'exemple de la fonction alcool, des liens entre structure et réactivité dans les réactions de chimie organique.

I - Structure et réactivité des alcools

- 1 **Structure de la fonction alcool**, différentes classes, réactivité (en rappel).

II - Relation réactivité - classe de l'alcool

- 1 **Sn1 ou Sn2 pour un alcool**, test de Lucas (**manip** tube à essai, JFLM2).
- 2 **E1 ou E2 (déshydratation intramoléculaire) pour former un alcène**, règle de Zaitsev.
- 3 **Compétition E vs Sn**
- 4 **Oxydation ménagée par le permanganate** (formation d'aldéhyde si primaire, cétone si secondaire, rien si tertiaire) (**manip** tube à essai, JFLM2).
(Mais on ne teste pas la présence d'aldéhyde ou de cétone. Difficile à faire car on utilise de l'acide sulfurique : pas de spectre IR, et il s'avère que les méthodes avec tests du type Tollens ou autres ne marchent pas...)
Mentionner le réactif de Sarett (qui permet de s'arrêter à l'aldéhyde, pyridine et CrO₃).
- 5 **Déshydratation intermoléculaire**, (Williamson et estérification dans cette partie).
- 6 **Estérification** : rendement de 66, 60 ou 15% selon la classe 1, 2 ou 3 de l'alcool (gène stérique dans le Grecias, mais alors ce n'est pas de la thermodynamique?).

III - Relation réactivité - isomérisation de constitution

- 1 Réactivité à l'acylation en fonction de l'isomérisation de constitution du nitrophénol (ortho, méta ou para) (**manip** tube à essai + CCM, JFLM2).

Mentionner les stéréoisomères.

Remarques

- Leçon testée en oral blanc : le timing est correct.
- Le titre de cette leçon est une ligne du programme de T STL SPCL.
- Quand par ex. on compare la classe des alcools, bien prendre des alcools par ailleurs de même masse molaire. C'est le cas ici.

Pourquoi des pKa de 18 (tertiaires), 17 (secondaires), 16 (primaires), dans cet ordre là ?

Parce que les groupements alkyles sont électrodonneurs, donc concentrent des charges négatives vers le carbone central et empêchent la charge négative de l'oxygène de se délocaliser : la base est donc moins stabilisée.

Test de Lucas

La Sn2 avec le primaire ne peut pas avoir lieu avec un chlorure, car il s'agit d'un nucléophile trop faible. D'autre part, la Sn1 non plus, c'est pour cela qu'il n'y a pas de réaction. (En revanche, avec des ions bromures ou iodures, on aurait la Sn2.) Cf Vohlard.

LC 11 – Capteurs électrochimiques (L)

Plan

Manips :

- Dosage du sérum physiologique : conductimétrie puis potentiométrie (JFLM).
- Titration Fe par Ce (JFLM, Fosset Tout en un).
- Électrode de Clark à dioxygène (Rouessac, Fosset, notice).

Pré-requis :

- Oxydoréduction, électrode, formule de Nernst, titrage colorimétrique.
- Acide/base, titrage pH-métrique, équivalence.

Introduction

Axer sur CAPTEUR/appareil de mesure.

Importance de connaître la composition précise des produits (contrôle qualité alimentaire, industriel, détection de pollution, ...).

→ Il faut des capteurs précis.

On a déjà vu les titrages colorimétriques, les dosages par étalonnage. On va voir ici des capteurs électrochimiques.

But : décrire ces capteurs / les utiliser sur des exemples / discuter de la précision.

I - Capteur conductimétrique

1 Principe du conductimètre (transparent).

Dosage du sérum physiologique par conductimétrie (**manip**).

Parler de la validité de la loi de Kohlrausch.

2 Mesure ponctuelle : résultat et incertitude.

3 Avec une droite d'étalonnage (en préparation) : résultat et incertitude.

II - Capteur potentiométrique

1 Principe d'une mesure potentiométrique

Potentiel d'une électrode, formule de Nernst, nécessité d'une référence (ce sont des rappels), description de l'électrode au calomel (si temps).

2 Titration argentimétrique du sérum physiologique (**manip**) : résultat et incertitude, permet de remonter aux constantes.

3 Titration Fe par Ce (**manip**) (à passer si pas le temps).

Mentionner l'électrode de verre (sans la détailler).

III - Capteurs ampérométriques spécifiques

1 Principe : une membrane sélective laisse passer O₂ ou autre gaz ou espèce. Cette espèce est réduite ou oxydée sur une électrode de travail, ce qui produit un courant. On mesure ce courant, qui est proportionnel à la concentration.

2 L'électrode de Clark

Manip et schéma (Rouessac fig. 20.6, Tout en Un).

3 Autres : capteurs gazeux, CO et O₂, Rouessac fig. 20.9.

Conclusion et ouverture

Parler de ce qu'on n'a pas fait : électrodes spécifiques : de verre, aux ions iodures, qui sont spécifiques mais dans une certaine limite (erreur alcaline pour celle de verre, on peut même faire une manip rapide en mesurant de la soude et de la potasse à 0.1 mol/L).

On peut parler des éthylotests (Hachette TS p.111), et probablement des détecteurs de monoxyde de carbone.

Remarques

Aller voir le programme de terminale STL option SPCL.

LC 12 – Molécules de la santé (L)

Plan

Bibliographie :

- Atlas de poche de biochimie, Koolman et Röhm.
- Livres ST2S terminale et première.
- Tec&Doc PCSI et PC.
- Paul Arnaud : les sucres.
- JFLM : aspirine et eau de javel.

Manips :

- Synthèse de l'aspirine (JFLM).
- Eau de Javel : titrage en retour par iodométrie (JFLM).

I - Synthèse de l'aspirine

Historique, effets, et synthèse.

II - Désinfectants : l'eau de javel

1 Action des désinfectants et antiseptiques

Entre dans les cellules des bactéries, oxyde les éléments, et les tue.
Voir ST2S, action des désinfectants.

III - Digestion des sucres

Idem leçon suivante. Détailler plus ou moins selon le temps. Axer sur la santé et sur la nécessité de contrôler l'apport en sucres dans l'organisme.

Conclusion et ouverture

Vers la leçon molécules du vivant : lipides, protéines, etc...

LC 13 – Structures et propriétés de molécules du vivant (L)

Plan

Bibliographie :

- Atlas de poche de biochimie, Koolman et Röhm.
- Tec&Doc PCSI pour les sucres.
- Paul Arnaud pour les sucres.
- Mesplède 100 manipulations de chimie organique.
- Brénon-Audat.
- Livres terminale ST2S : acides aminés, savon.

Manips :

- Saponification de l'huile d'olive (JFLM).
- Dosage de la glycine (Mesplède chimie organique, Brénon-Audat).

Introduction

Quatre grandes classes de molécules du vivant : les lipides (acides gras, i.e., acide carboxyliques à longue chaîne), les glucides (les sucres), les protéines (composées d'acides aminés), les acides nucléiques (par exemple l'ADN ou l'ATP, constitué d'assemblages de nucléotides, eux mêmes étant une base + sucre + résidu acide phosphorique).

Ici on s'intéresse aux sucres, à leur rôle dans la fabrication de l'ATP (adénosine triphosphate), ainsi qu'aux protéines et aux lipides.

I - Acides aminés et protéines

Paul Arnaud, Atlas.

1 Les acides aminés

Description : acide carboxylique + amine. S'assemblent via la liaison peptidique.

Produits par les plantes, digérés par l'organisme, et utilisés.

Briques des peptides (petits assemblages d'acides aminés) et des protéines (gros assemblages). Tous de configuration L.

Manip : dosage de la glycine (suivi par pH et σ).

2 Structure des protéines

Structure linéaire, structure secondaire (en hélice ou en feuillets), structure tertiaire.

3 Les enzymes : protéines catalysantes très spécifiques.

Retour sur la digestion et l'enzyme associée : il y a en fait des enzymes partout.

Permettent de catalyser de façon *sélective* les réactions au sein des cellules, et donc de choisir lesquelles, parmi toutes celles possibles, ont lieu.

II - Les lipides

Raconter les lipides, qui sont, comme les sucres, une source d'énergie. Et qui forment les barrières des cellules (ils sont alors phosphorés).

Manip : saponification. 90% des lipides des aliments sont des triglycérides, comme dans l'huile d'olive. On va voir qu'on peut les transformer en acides gras, caractérisés ici par leur capacité à faire des micelles et des liposomes et des bulles (ça mousse). Dans l'organisme, c'est fait différemment (via des enzymes, ...).

III - La digestion des sucres

1 Les sucres : des plantes aux muscles

Description : hydrates de carbone, $C_nH_{2n}O_n$. Synthétisés par les plantes via la photosynthèse. Catabolisme : sucre transformé en glucose, qui est ensuite (anabolisme) stocké sous forme de glycogène par le foie, acheminé vers les muscles, oxydé par une réaction enzymatique exergonique.

2 Les glucides (Tec&Doc PCSI, Paul Arnaud)

Exemples du fructose et du glucose.

Expliquer la représentation de Fischer, nomenclature L et D.

Hémiacétalisation : alcool + aldéhyde, tous deux présents dans la molécule. Mécanisme sur le cas du glucose, donnant le β -D-glycopyranose.

L'organisme peut exploiter le glucose seulement.

3 Hydrolyse de l'amidon

L'amidon (Atlas, à polysaccharides végétaux) : polysaccharide extrêmement répandu, le plus important de l'alimentation humaine. Feuilles, fruits, graines, tubercules, 75% du poids sec du blé, ...

Présentation du polymère.

Bilan de l'hydrolyse de l'amidon (en fait non, trop compliqué de tout équilibrer).

4 Rôle du glucose dans l'apport d'énergie (Atlas, à glycolyse)

Bilan de la glycolyse : $\text{glucose} + 2\text{ADP} + 2\text{NAD}^+ = 2\text{pyruvates} + 2\text{ATP} + 2(\text{NADH} + \text{H}^+)$

Attention : cette réaction n'est pas équilibrée...

Où : le couple oxydant/réducteur $\text{NAD}^+/\text{NADH} + \text{H}^+$ est une coenzyme qui participe au transferts d'électrons ; pyruvate est $\text{CH}_3 - \text{CO} - \text{COO}^-$; ADP et ATP sont les fameuses bases nucléotides.

Expliquer le rôle de l'ATP pour la suite : sa décomposition en $\text{ADP} + \text{P}$, qui est exergonique, permet de réaliser par couplage des réactions qui, sinon, n'ont pas lieu. Exemples : mouvement (les muscles), anabolisme...

Conclusion et ouverture

C'était un aperçu. On aurait pu parler des agents désinfectants, qui sont souvent des oxydants ou réducteurs puissants qui vont dans les cellules, réagissent, et les détruisent.

Remarques

Métabolisme : ensemble des réactions chimiques ayant lieu dans les cellules.

La cellule : milieu réactionnel, avec différents compartiments réactionnels et plein de molécules.

Enzymes : au sein des cellules, elles catalysent de façon sélective les réactions. L'aspect sélectif est primordial, sans lui, tout réagirait n'importe comment. Elles permettent le choix d'un chemin réactionnel privilégié.

Catabolisme : transformer des molécules complexes en molécules simples. Ex. : la digestion, et on parle entre autres de catabolisme des glucides, de catabolisme des lipides, des protéines, des acides nucléiques, ...

Anabolisme : transformer des molécules simples en molécules complexes. Ex. de l'anabolisme des sucres : en cas de manque de glucose, l'organisme peut en fabriquer.

On parlera de métabolisme des sucres, par exemple, pour désigner la gestion des sucres par

l'organisme. C'est donc la combinaison du catabolisme et de l'anabolisme des sucres. Il ne faut pas tout faire en même temps, et les enzymes sont là pour réguler correctement.

Coenzyme : par exemple NAD^+ est une coenzyme qui participe aux transferts d'électrons (aux réactions redox). Contrairement aux enzymes, les coenzymes interviennent dans une large classe de réactions.

LC 14 – Réaction chimique par échange de proton (L)

Plan

Bibliographie :

- Hachette TS.
- JFLM.
- Grecias PCSI et Tout en Un Fosset PCSI.

Pré-requis :

- Conductimétrie.
- Équilibre chimique (voir remarques).

Manips :

- Introduction qualitative : 1 mL d'acide acétique pur dans 100 mL d'eau, pH. Idem avec HCl.
- Étude calorimétrique (Hachette TS).
- Dosage conductimétrique et pH-métrique du vinaigre (JFLM1).
- Tri-acide sur Simulwin.

I - Notion de pH, de couple acido-basique

1 Définition du pH.

Cologarithme de l'activité de H^+ (mais on utilise la concentration ici). On peut le mesurer.
Manip : pH de l'eau, puis ajout de HCl (dire que c'est du H_3O^+) : le pH change, il y a eu réaction.

Ajout de CH_3COOH (1 mL pur dans 99 mL d'eau), et mesure du pH. Il y a eu réaction, non totale.

But : formaliser tout ça pour pouvoir être prédictif.

2 Couple acide/base et réaction acido-basique.

Exemples. Couples de l'eau.

Réaction acidobasique. Définir acide et base de Bronsted.

3 Acides et bases fortes ou faibles, constante d'acidité.

Acides et bases fortes.

Explication de la manip précédente avec l'acide fort : réaction totale, on en déduit $pH = pC$.

Transition : ça ne marche pas pour CH_3COOH : non totale ?

Puis faibles : constante d'acidité $K_A = [A^-][H^+]/[AH]$. Motivé par la manip précédente, qu'on explique : s'il y a équilibre, alors c'est que $pH = 0.5(pK_a + pC)$, d'où l'on déduit pK_a .

Échelle des pK_a dans l'eau.

4 Domaine de prédominance, réaction entre couples.

II - Illustrations de propriétés

1 Étude calorimétrique d'un acide fort dans une base forte (**manip**).

Aspect pédagogique : souligne les dangers. Protocole du Hachette TS p. 325 (remonter à l'énergie par mole, dire qu'on peut alors prédire un échauffement pour d'autres concentrations).

2 Dosage conductimétrique d'un acide : vinaigre (**manip**).

Insister sur l'aspect échange de proton qui fait que $\lambda_{H^+}^0$ et $\lambda_{HO^-}^0$ est grand.

III - Titrage pH-métrie

Manip : vinaigre par pH-métrie.

Cas d'un tri-acide avec Simulwin.

Remarques

Attention sur les incertitudes pour le pH

Deux chiffres significatifs (3 si on est optimiste), pas plus. Incertitude qui vient souvent de la solution tampon qui sert à étalonner, typiquement ± 0.05 u.pH.

Ceci implique une incertitude plus grosse encore sur $[\text{H}_3\text{O}^+]$, qu'on écrit avec un chiffre significatif de moins que le pH.

Au programme de TS

L'aspect thermique de la réaction base forte avec acide fort.

A propos du pré-requis "équilibres" : en TS cette notion, et celle de constante d'équilibre, est abordée avec les réactions acide base. De plus, avant la leçon s'appelaient "équilibre chimique : les cas des réactions acide/base". C'est donc un point important.

Fonctionnement du papier pH

C'est un papier imbibé d'un indicateur universel, usuellement un mélange de différents indicateurs colorés (phénolphtaléine, rouge de méthyle, etc...). Fonctionne aussi avec du chou rouge.

Autres

Notion de tampon. Dans l'organisme, ce sont les acides phosphorique et carbonique qui sont utilisés pour maintenir un pH autour de 7.

LC 15 – Solvants (CP)

Plan

Bibliographie :

- Tout en un PC (bien).
- Tec&Doc PC.
- JFLM 1 et 2.

Manips :

- NaCl dans du cyclohexane et dans de l'eau.
- Miscibilité : EtOH + eau, heptane + cyclohexane, eau + cyclohexane.
- Diode dans eau et cyclohexane (JFLM1).
- Synthèse de l'éthanoate d'isoamyle : au micro-onde. Le choix du solvant, les diverses extractions, illustrent les avantages d'un choix judicieux de solvant (JFLM2).

Pré-requis :

- Liaisons inter-moléculaires.
- Polarité des molécules.

Introduction

Le solvant est souvent le grand oublié des élèves. Par exemple l'indice (aq) cache des formes solvatées plus complexes : H^+ , Fe^{2+} , ... Il est pourtant essentiel :

- Il permet aux solutés de se rencontrer,
- il homogénéise la température,
- il influe sur les réactions (rôle sélectif),
- change les E^0 , nivelle les a/b, mur du solvant, ...

I - Propriétés des solvants

Aller vite, montrer un tableau avec des solvants et leurs caractéristiques.

1 Polarité, ionise les molécules polaires.

2 Permittivité, limite dissociant/non dissociant à $\epsilon_r \sim 20$. Dissocie.

3 Proticité, capacité à faire des liaisons H.

On va voir comment ces propriétés permettent d'expliquer la miscibilité et la solubilité.

II - Miscibilité, solubilité

1 Dissolution d'un composé

Manip : NaCl dans du cyclohexane et dans de l'eau.

Décrire les étapes d'une dissolution d'un composé polarisable : ionisation, dissociation, solvation.

A chaque fois, dire quelle propriété du solvant intervient. Dire que pour un composé ionique, l'ionisation n'est pas nécessaire, et que parfois seule la solvation a lieu (I_2 par exemple).

2 Les semblables dissolvent les semblables

Explication avec les mains. **Manip** avec I_2 dans l'eau et le cyclohexane (JFLM1).

3 Miscibilité de deux solvants

Explication avec les mains, puis **manip** avec de l'eau, du cyclohexane, de l'éthanol, de l'heptane, ... (à passer si temps, car on en fait après).

III - Exploitation en synthèse organique

Maintenant qu'on connaît et comprend les propriétés des solvants, on peut s'en servir pour extraire et purifier un produit.

1 **Manip** : Ester isoamylique, ou de poire, au micro-onde ou classique.

Le purifier en expliquant, faire un IR avant et après pour montrer que c'est nécessaire et que ça a marché.

Conclusion et ouverture

Aussi utile pour une CCM (plus ou moins d'affinité avec le produit déposé), recristallisation, en catalyse hétérogène, ... Permet de stabiliser plus ou moins un intermédiaire réactionnel, et ainsi de changer la cinétique, et de changer les mécanismes (par exemple Sn1 vs Sn2).

LC 16 – Classification périodique (CP)

Plan

Bibliographie :

- Tec&Doc PCSI ancienne édition.
- Tout en un PCSI.
- JFLM2.
- Expériences de la famille redox.

Manips :

- Logiciel pour montrer la table.
- Précipitation des halogènes avec Ag (JFLM2).
- Na dans l'eau (JFLM1).
- Pouvoir oxydant des couples X_2/X^- (expériences de la famille redox, faire du dibrome...).
- Propriétés acide des oxydes : P_2O_5 et CaO (pas de livre).

Pré-requis :

- Liaisons inter-moléculaire.
- Structure électronique des atomes.

Introduction

Petit historique.

I - Organisation du tableau périodique

Élément = défini par son numéro atomique (des ions sont un même élément). Se conserve lors d'une réaction chimique.

1 Organisation du tableau

Montrer avec un logiciel. Change de ligne quand n change. s, p, d, f.

2 Quelques propriétés périodiques

On illustre l'intérêt avec des 1ers exemples : colonne des gaz nobles, alcalins, alcalino-terreux, métaux de transition, électrons de valence identiques sur une colonne, de cœur identiques sur une ligne.

Cas des halogènes : **manip** solubilité des précipités AgCl, AgBr, AgI (avec dissolution par complexation de l'un d'eux), illustre la similarité et les différences. Interprétation avec la différence d'électronégativité.

II - Propriétés physiques atomiques

On explore ici les propriétés microscopiques des éléments considérés individuellement.

1 Rayon

Donner la formule.

2 Électronégativité

De Mulliken et de Pauling.

III - Propriétés chimiques

Partie sur les propriétés macroscopiques (solides, liquides, gaz, plusieurs moles).

1 État des corps purs : métaux, généralités, cas des halogènes.

Montrer I₂ solide, dire que Cl₂ est gazeux, et que Br₂ est liquide.

2 Caractère oxydant ou réducteur des halogènes et des alcalins

Manip ou pas : comparer le pouvoir oxydant de Cl₂/Cl⁻ et I₂/I⁻. Attention, il faut préparer l'eau de chlore et l'eau de brome (et il y a des choses fausses dans le "expériences de la famille redox"). À la fin, détruire les dihalogènes en repassant en milieu basique.

Avoir du thiosulfate pour neutraliser au cas où ? Ne pas faire de dichlore, car il ne peut pas être neutralisé, alors que Br₂ oui ?

Manip : Na dans l'eau. Avoir une pissette d'éthanol pour nettoyer. La réaction en milieu neutre est $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{HO}^- + \frac{1}{2}\text{H}_2$.

3 Propriétés des oxydes

Manip : dissoudre P₂O₅ et CaO, montrer l'acidification et la basification.

Conclusion et ouverture

Ouverture : charte des nucléides, Lewis : règles de l'octet et du duet et structure électronique des molécules.

Remarques

Manips tube à essai ici. Attention, verser au goutte à goutte, stopper dès qu'il y a ce que l'on veut.

Interprétation de la formule de l'électronégativité de Pauling

Elle est définie comme : $(\chi_A - \chi_B)^2 = \delta = D_{A-B} - \sqrt{D_{A-A}D_{B-B}}$. Une liaison chimique $A-B$ est décrite comme ayant une partie covalente, dont l'énergie est donnée par $\sqrt{D_{A-A}D_{B-B}}$, et une partie ionique, dont l'énergie est donc $D_{A-B} - \sqrt{D_{A-A}D_{B-B}}$. Ce Δ est donc positif si l'énergie ionique est positive, et on voit que plus la liaison ionique est forte, plus les charges sont localisées sur une seule molécule, et donc plus la différence d'électronégativité entre A et B est grande. Source : Wikipedia.

LC 17 – Solides cristallins (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PCSI nouveau programme.
- Durupthy ou Mallet, chimie des matériaux inorganiques, PCSI et 2ème année.

Manips :

- Estimer a pour le cuivre (avec le pycnomètre) (Handbook).
- Recalescence du fer.
- Malléabilité du plomb, nature cassante du sel.
- Logiciel Vesta.
- Montrer des modèles éclatés et compacts (les deux). Sphères de polystyrène?

I - Le modèle du cristal parfait

But : donner les outils théoriques permettant de modéliser la géométrie d'un cristal.

1 Structure cristalline : motif, réseau, maille.

Exemples de mailles.

2 Caractéristiques d'une maille : cas de la cfc. Population, coordinence, compacité, masse volumique.

Manip : estimer a pour un métal à partir d'une mesure de ρ (pycnometre, le peser, estimer son volume). Sites interstitiels.

3 Alliages (si temps, ou dire qu'on n'en parle pas).

4 Structures compactes. Modèle jouet.

Manip : transition allotropique du fer.

II - Nature des liaisons, liens avec les propriétés macroscopiques

On a déjà vu qu'au sein d'une molécule, on peut avoir des liaisons plutôt covalentes ou plutôt ioniques, et qu'entre molécules on a des interactions de VdW ou des liaisons H.

→ Ici aussi on va retrouver tout ça, avec en plus la liaison métallique.

1 Les différents types de cristaux. Métalliques, covalents, ioniques, moléculaires (VdW et H).

2 Températures de fusion.

Permet d'estimer l'énergie de liaison. Tableau avec tous les types.

Cas des moléculaires : l'eau devrait geler beaucoup plus froid.

3 Particularités de la liaison métallique.

Malléabilité, dureté, conductivité, ... **Manip** : casser des bout de gros sel, et plier une barre de plomb. Interpréter avec le glissement des plans.

4 Comment prédire la nature des liaisons ?

Avec l'expérience et d'après ce qu'on a dit.

Avec le triangle VAK.

Conclusion et ouverture

Alliages (si non abordés), défauts dans les cristaux.

Remarques

Lire le programme. Par exemple, seule la cfc est exigible.

On pourrait aussi parler de solubilité, et reprendre des manips de la leçon correspondante ?

Définitions

Voir Alloul.

Motif élémentaire : ensemble d'atomes et de molécules positionnés à une certaine distance qui, répété périodiquement, permet de décrire toute la structure considérée.

Réseau cristallin ou réseau de Bravais : l'ensemble des points obtenus à partir de l'origine en effectuant toutes les translations nécessaires au pavage de l'espace. C'est donc un ensemble de points non matériels, appelés nœuds du réseau.

Atomes et molécules constituent le motif. Ils sont confondus avec les nœuds du réseau si le motif est constitué d'un seul atome, mais dans le cas contraire la confusion n'est pas possible.

Maille élémentaire : c'est un volume, le plus petit qui, par répétition périodique, pave tout l'espace. Elle contient un certain nombre de motifs. On définit parfois une maille conventionnelle, qui n'est pas la plus petite possible.

LC 18 – Corps purs et mélanges binaires (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PC nouveau programme, Fosset PC.
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques.
- Durupthy, H-prépa PC.

Manips :

- Eau et acide acétique au froid.
- Solidification de l'étain, et d'un mélange étain-plomb (Daumarie).
- Fondant eau + sel.

Pré-requis :

- Variance, changement d'état du corps pur (introduits séparément, ici on lie les deux).
- Banc Kofler, recristallisation.
- Cristallographie.

Introduction

Corps pur : changement d'état à T, P constants dans des conditions monobares. Que se passe-t-il si on refroidit un mélange de deux liquides ? Solidifient successivement ? Non : *les interactions moléculaires sont modifiées et modifient largement les propriétés.*

Manip : on a un bain de glace/sel à -15 degrés (déjà, c'est louche), tubes à essai avec de l'eau, de l'acide acétique, et un mélange des deux : le mélange ne gèle pas !

But : passer en revue les propriétés des corps purs, en les mettant en relation avec la variance.

Puis considérer des mélanges binaires liquides-solides, et décrire des outils pour les comprendre, dont encore la variance.

I - Corps pur et variance

1 Les états du corps pur

Manip de refroidissement de l'étain (tracer T à l'ordinateur, thermocouple).

Définir corps pur. Diagramme dans le cas de l'eau.

2 Variance

Sur transparent. Arriver à $v = 3 - \phi$.

3 Courbes d'analyse thermique, en lien avec la manip.

II - Mélanges binaires liquide-solide

Ici, liquides miscibles.

1 Miscibilité totale à l'état solide

Définir SSS et SSI et ce qu'est une solution solide.

Cas idéal, expliquer le diagramme avec variance, courbe d'analyse thermique, signification du fuseau.

Le faire sur le cas de Ge-Si.

Théorème de l'horizontale.

Théorème de moments.
Cas non-idéal (très vite).

2 Miscibilité nulle à l'état solide

C'est le plus courant. Courbe d'analyse thermique, montrer que la solidification ne forme pas un solide uniforme.

Mentionner les composés définis.

Manip étain-plomb : courbe de refroidissement.

3 Le mélange eau-sel : possibilité de descendre à $T < 0$ degrés. Fondant sur les routes.

4 Purification par recristallisation et test de pureté

Conclusion et ouverture

Discuter des propriétés des alliages ?

Utilité pour la soudure : plomb-étain car T_{fusion} est abaissé, pour la purification (ex. de silicium-fer), pour les alliages de fer (diagramme Fe-C : fer, acier, fonte), ...

Remarques

Attention, il semblerait que la notion de potentiel chimique n'est plus au programme (sauf en PC) : il ne faut pas l'utiliser (et il faut lire les programmes!).

Définition d'une phase

Une phase : domaine de l'espace où les paramètres intensifs varient continûment.

Une solution homogène = une phase, l'atmosphère = une phase (même s'il y a un gradient).
De l'huile émulsionnée dans de l'eau = deux phases.

Définition d'un corps pur

D'après le Dictionnaire de physique de Taillet, c'est un *corps constitué d'un seul type de composant (atome ou molécule)*.

Beaucoup de livres le définissent comme un *corps constitué d'une seule espèce chimique*.

Exemples : $\text{Ar}_{(g)}$, $\text{O}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$, ... (on n'a pas à préciser l'état solide, liquide, ... car un même corps pur existe sous différents états).

Contres exemples : mélange eau-éthanol, polymères (pour ceux constitués de chaînes de longueurs différentes), alliages (et solutions solides).

Les composés définis (comme MgZn_2) et les sels ioniques (comme NaCl) ne sont pas constitués de la répétition d'un seul type de composant, mais d'une répétition périodique de Na et de Cl ; lorsque $\text{NaCl}_{(s)}$ fond, cela donne un sel fondu avec Na^+ et Cl^- "séparés", et non pas $\text{NaCl}_{(l)}$. Ils sont néanmoins composés d'une seule espèce chimique. On peut les considérer comme des corps purs.

Les phases amorphes peuvent être composées d'un seul type de composé, mais elles ne sont pas à l'équilibre thermodynamique (et de fait, ne fondent pas à T fixe sous pression constante), on peut donc décider ou non de les appeler corps purs selon que l'on impose l'équilibre thermodynamique ou non dans la définition.

Le goldbook de l'IUPAC est en anglais, et le terme anglais s'approchant le plus de corps pur est celui de chemical substance (<https://goldbook.iupac.org/html/C/C01039.html>). Ils

écrivent alors : “Matter of constant composition best characterized by the entities (molecules, formula units, atoms) it is composed of. Physical properties such as density, refractive index, electric conductivity, melting point etc. characterize the chemical substance.” Cela a donc un sens assez large pour inclure les composés définis ou les sels ioniques.

Entité moléculaire (molecular entity) et espèce chimique (chemical species)

D’après l’IUPAC, molecular entity : “Any constitutionally or isotopically distinct atom, molecule, ion, ion pair, radical, radical ion, complex, conformer etc., identifiable as a separately distinguishable entity. Molecular entity is used in this Compendium as a general term for singular entities, irrespective of their nature, while chemical species stands for sets or ensembles of molecular entities. Note that the name of a compound may refer to the respective molecular entity or to the chemical species, e.g. methane, may mean a single molecule of CH₄ (molecular entity) or a molar amount, specified or not (chemical species), participating in a reaction. The degree of precision necessary to describe a molecular entity depends on the context. For example ‘hydrogen molecule’ is an adequate definition of a certain molecular entity for some purposes, whereas for others it is necessary to distinguish the electronic state and/or vibrational state and/or nuclear spin, etc. of the hydrogen molecule.”

D’après l’IUPAC, chemical species : “An ensemble of chemically identical molecular entities that can explore the same set of molecular energy levels on the time scale of the experiment. The term is applied equally to a set of chemically identical atomic or molecular structural units in a solid array. For example, two conformational isomers may be interconverted sufficiently slowly to be detectable by separate NMR spectra and hence to be considered to be separate chemical species on a time scale governed by the radiofrequency of the spectrometer used. On the other hand, in a slow chemical reaction the same mixture of conformers may behave as a single chemical species, i.e. there is virtually complete equilibrium population of the total set of molecular energy levels belonging to the two conformers. Except where the context requires otherwise, the term is taken to refer to a set of molecular entities containing isotopes in their natural abundance. The wording of the definition given in the first paragraph is intended to embrace both cases such as graphite, sodium chloride or a surface oxide, where the basic structural units may not be capable of isolated existence, as well as those cases where they are. In common chemical usage generic and specific chemical names (such as radical or hydroxide ion) or chemical formulae refer either to a chemical species or to a molecular entity.”

En résumé, une espèce chimique est un grand nombre – de l’ordre de la mole – d’entité moléculaires identiques – entité moléculaire étant pris au sens défini précédemment : e.g. des atomes, des molécules, des ions, des paires d’ions, des radicaux, ... – qui peuvent explorer le même ensemble de niveaux d’énergie sur le temps de l’expérience considérée.

Ainsi un solide ionique est une espèce chimique.

Une même espèce chimique peut exister sous différents états.

Élément chimique

L’élément chimique de numéro atomique Z représente l’ensemble des atomes ou des ions dont le noyau contient Z protons.

Théorème des moments

On ne peut pas appliquer le théorème des moments en nombre de moles quand il y a un composé défini, car on n’a pas $n(A_a B_b) = n(A) + n(B)$. En revanche, on peut en masse. Voir Durupthy PC.

Solidification avec solides non miscibles

La solidification étant exothermique, le refroidissement est ralenti.

Lors de la solidification, le solide formé n'est pas homogène en composition : il cristallise de moins en moins pur (ou l'inverse). Il y a ensuite un réarrangement par diffusion au sein du solide vers un état homogène (mais c'est très lent).

Un solide composé de deux solides non miscibles, formé à l'eutectie, peut avoir différents arrangements microscopiques des cristaux.

Le solide formé pour le mélange eutectique est par contre plus homogène. C'est pourquoi il est souvent utilisé.

Voir par exemple le H-Prépa, ou http://fr.wikiversity.org/wiki/Introduction_%C3%A0_la_science_des_mat%C3%A9riaux/Diagrammes_binaires.

Voir aussi http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/module_SM_1.html.

Purification par recristallisation

Composé A avec impuretés X, que l'on dissout dans un solvant. C'est en fait sûrement plus compliqué que ce qu'on dit tout le temps. Par exemple, on considère uniquement le diagramme binaire (composé A)-Solvant, et jamais (impuretés X)-Solvant. Mais il faut bien que lors de la recristallisation, X (les impuretés) ne recristallisent pas ! Comme X est en faible quantité, on est à la droite du diagramme, et s'il y a cristallisation, c'est d'abord le solvant pur qui apparaît. Il faut donc s'arrêter avant cette limite, qui est quelque part entre $T_{\text{fusion solvant}}$ et $T_{\text{eutectie solvant-X}}$.

Autres exemples d'applications

- Tests d'acide carboxyliques. Voir par exemple le Tec&Doc PC p. 49 pour un exemple où on identifie un acide carboxylique à l'aide de sa température de fusion au banc Kofler lorsqu'il est précipité par la 2,4-DNPH (valeurs qui sont tabulées ?).
- Si on parle des composés définis, on peut faire la manip de JFLM2 avec le point de fusion du mélange racémique L-D. Un composé d'énantiomères L et D présente en effet un diagramme binaire similaire à celui d'un composé défini. Attention toutefois à voir si c'est vraiment équivalent ou juste analogue.

Au programme de classe préparatoire

Dans les programmes : rien en MPSI et MP ; binaires liquide-solides en PSI ; binaires liquide-solide et liquide-vapeur en PC.

Lois de Dalton, Henry, Raoult, pression osmotique

Loi de Dalton

Pour un mélange de gaz, la pression totale est la somme des pressions partielles : $p = \sum_i p_i$, la pression partielle étant définie comme $x_i \times p$, x_i fraction molaire.

Elle est vérifiée expérimentalement aux faibles pressions et hautes températures, ie dans les conditions où les gaz se comportent de façon parfaite et où le mélange est idéal (pas d'interaction entre les molécules autres que des chocs élastiques, pas de volume propre des molécules : peu importe alors leur nature ! la loi est alors évidente du point de vue cinétique).

Loi de Henry

Elle s'applique dans une situation où un gaz est en équilibre au-dessus d'un solvant, le gaz pouvant se dissoudre en partie dans le solvant.

La loi de Henry indique que, à température constante et à l'équilibre, la concentration du gaz dissout est proportionnelle à la pression partielle exercée par le gaz sur le liquide.

On peut l'écrire

$$p_i = x_i^L K_i$$

avec p_i pression partielle au-dessus du liquide, x_i^L fraction molaire du gaz dans la solution.

Ou encore sous la forme

$$C_{s,i} = p_i H_i,$$

avec $C_{s,i}$ la concentration molaire à saturation (ie à l'équilibre) du gaz dans le liquide, p_i la pression partielle au-dessus de la solution, et H_i la constante de Henry.

Les constantes K_i ou H_i dépendent de la température, du gaz, du liquide.

La loi est valable pour de faibles concentrations du gaz dissout et pour une phase gazeuse parfaite. En fait, il faut que les activités soient données par p_i/p^0 pour le gaz, et par C_i/C^0 pour le gaz en solution : la loi traduit simplement l'équilibre

$$A_{(g)} = A_{(\text{dissout})}, \quad (K^0),$$

On a à l'équilibre $K^0(T) = Q_r = \frac{C_i/C^0}{p_i/p^0}$, et donc la constante de Henry est $H_i = K^0(T) \times \frac{p^0}{C^0}$. (C'est donc aussi une traduction de l'égalité des potentiels chimiques, en phase dissoute et en phase gaz.)

$$\text{On en particulier la loi de Van't Hoff : } \frac{d \ln H_i}{dT} = \frac{\Delta_{\text{dissolution}} H^0}{RT^2}.$$

À noter que tout ceci s'applique en l'absence de réactions chimiques du gaz dissout dans la solution. S'il y a réaction (par exemple CO_2 est un acide dans l'eau), ceci change la solubilité du gaz, et on peut alors écrire une constante de Henry effective.

Loi de Raoult

Deux versions : avec un soluté volatil (donc présent aussi dans la phase vapeur, et on peut alors faire un lien avec la loi de Henry), et avec un soluté non volatil (qui n'existe pas en phase vapeur, du sucre ou du sel par exemple).

Commençons par la première.

★ La loi de Raoult (1887) traduit le changement de pression de vapeur saturante d'une solution lorsque l'on dissout un composé dans celle-ci.

Par exemple mettre du sel dans de l'eau élève sa température d'ébullition, donc si l'on travaille plutôt à température constante abaisse sa pression de saturation.

Elle indique que l'abaissement de cette pression de saturation est proportionnelle à la fraction molaire de l'espèce dissoute.

$$\text{On a donc } \frac{p'_{\text{sat}} - p_{\text{sat}}}{p_{\text{sat}}} = - \frac{n_{\text{soluté}}}{n_{\text{tot solution}}}.$$

$$\text{Si on note } x = \frac{n_{\text{soluté}}}{n_{\text{tot solution}}}, \text{ on a } p'_{\text{sat}}(x) = (1 - x)p_{\text{sat}}(0).$$

Cette loi est valable pour $x \ll 1$, en fait pour une dilution faible et idéale.

★

Pression osmotique

Jean Perrin montre, via une démonstration de Arrhénius, que la loi de Raoult pour les composés non volatils est équivalente à la formule de Van't Hoff pour la pression osmotique (voir son livre p. 80).

Cette formule de Van't Hoff dit que toute matière dissoute exerce, sur une paroi qui l'arrête et laisse passer le solvant, une pression osmotique égale à $\pi = \frac{n}{V}RT$, avec $\frac{n}{V}$ la concentration molaire de l'espèce dissoute.

Cette loi est valable pour les faibles dilutions.

Le parallèle avec la loi des gaz parfaits est évident, et Jean Perrin dit ainsi que "Dans l'état gazeux ou dissous, un même nombre de molécules quelconques, enfermées dans le même volume à la même température, exercent la même pression sur les parois qui les arrêtent."

Cette loi a eu une importance historique dans la consolidation de l'hypothèse atomique (c'est la concentration molaire qui importe, une fois de plus), et dans la mise en évidence de la dissociations des sels en ions. La loi n'était en effet pas vérifiée pour les sels, puisque ceux-ci se dissocient en paires d'ions, doublant ainsi la pression osmotique! C'est Arrhénius qui, partant de ce constat d'un doublement de la pression osmotique mesurée pour certains sels dissout, en a conclu qu'ils se séparent en Na et Cl par exemple, et comme ces solutions étaient toujours conductrices, il a soutenu qu'il s'agissait d'espèces chargées, appelons les des ions... Par ailleurs certains sels se dissocient partiellement seulement, et il y avait accord entre une mesure réduite de conductivité et un abaissement de pression osmotique, ce qui, comme le souligne Jean Perrin, fait le lien entre conductivité électrique et pression de saturation (via Raoult), ce qui est tout de même impressionnant.

LC 19 – Oxydoréduction (CP)

Plan

Bibliographie :

- Tec&Doc PCSI (presque tout le plan) et PC.
- JFLM1.
- Fosset PSI : accumulateur au plomb.
- Expériences de la famille redox : pKd du complexe fer-sulfate dans les conditions du dosage de la manip.

Manips :

- Intro : limaille de fer dans sulfate de cuivre : couleur rouge, limaille de fer dans sulfate de zinc : rien (JFLM1).
- Pile Daniell (JFLM).
- Plaque de Zn dans un milieu acide : dégage H₂ : nécessité de piles pour récupérer le travail.
- Titrage Fe/Ce (JFLM2, Tout en un Fosset pour interprétation). Méthode de Gran ok seulement après l'équivalence.

Introduction

Oxydoréduction : classe de réaction par échange d'électrons, très importante. Leçon qui introduit les concepts fondamentaux.

I - Principes de l'oxydoréduction

1 Transferts électroniques.

Manip : limaille de fer dans sulfate de cuivre et sulfate de zinc (JFLM1). Définir tout.

2 Les nombres d'oxydation.

3 Équilibrer une réaction.

II - Piles électrochimiques, formule de Nernst

Manip : plaque de Zn dans un milieu acide : dégage H₂. Expliquer la réaction.

Problème : on ne peut pas profiter du transfert d'électrons. On va donc séparer les constituants.

1 Demi-piles et électrodes.

Définitions (suivre Fosset plutôt que Grecias).

2 La pile Daniell, **Manip** (JFLM1). Mesure de V , en déduire le sens de la réaction.

3 Potentiel d'électrode ou de couple, formule de Nernst.

Démo complète thermodynamique avec $\Delta_r G^o$, ...

Lien $e_{\text{pile}}^o = RT/(nF) \ln K^o$.

4 Classification des couples (transparent).

Analogie acide/base, règle du γ .

Retrouver le e_{pile} de la pile Daniell.

5 S'il y a vraiment le temps, accumulateur au plomb ?

III - Application aux dosages

Idee : on réinvesti nos connaissances pour un cas utile. On peut mentionner la méthode de Winkler.

1 Il faut des électrodes de référence.

Décrire $\text{Hg}_{(l)}|\text{Hg}_2\text{Cl}_{2(s)}|\text{Cl}^\ominus$, ou (mieux car celle au calomel est maintenant interdite dans les lycées, mercure...) celle à Ag, AgCl.

2 Exemple : Manip, JFLM1, titrage des ions Fe^{2+} par les ions Ce^{4+} .

Établir K^o à partir des potentiels.

Titrer d'abord avec potentiométrie.

Conclusion

Classe de réaction importante pour le stockage d'énergie, pour les contrôles de qualité (ex. de la méthode de Winkler pour doser O_2 dans l'eau et en déduire la présence ou non de micro-organismes), et (on le verra plus tard) la réduction des oxydes métalliques pour faire des métaux, la combustion, la chimie organique (conversion alcool, aldéhyde, acide carboxylique), ...

Remarques

Dosage des ions ferreux

Ion cerreux (3+) / cerrique (4+).

Le sel de Mohr est composé de $2\text{NH}_4^+ + \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-}$. On l'utilise à la place d'une solution de sulfate de fer II parce qu'il est moins facilement oxydable à l'air.

Les ions cérium IV sont dans une solution de nitrate de cérium, $2\text{NH}_4^+ + \text{Ce}^{4+} + 6\text{NO}_3^-$.

Attention, la solution cerrique ainsi que le sel de Mohr sont en solution acide sulfurique à 1M. Ceci est nécessaire car Ce^{4+} précipite en CeOH_4 dès $\text{pH} > 1$, et le fer III précipite également. Ainsi, les ions fer complexent avec SO_4^{2-} , ce qui modifie les potentiels et en particulier celui à la demi-équivalence. Les pKd des complexes fer/sulfate sont dans "expériences de la famille redox" : le couple à considérer est, usuellement avec les concentrations de SO_4^- présentes, $\text{Fe}^{(\text{III})}\text{HSO}_4^{2+}/\text{Fe}^{2+}$, et on a un $E^0 \sim 0.68$ pour ce couple là.

D'autre part, le potentiel à la double équivalence n'est pas celui du couple $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$, car ce dernier est supérieur à celui de l'eau. Il se forme donc un potentiel mixte entre 1.23V et 1.77V.

A $V = 0$, le potentiel de la solution est défini car le dioxygène de l'air oxyde une infime partie des ions Fe^{2+} .

LC 20 – Détermination de constantes d'équilibre (CP)

Plan

Manips :

- K^0 pour CH_3COOH (mesure de pH à un point, puis avec courbe de titrage).
 - Constante de CaSO_4 (par conductivité) (Daumarie).
 - K^0 d'un ester (JFLM2).
 - Sérum physiologique permet de remonter à K_s de AgCl et E^0 de Ag^+/Ag (JFLM).
- Axer sur la précision des mesures, incertitudes.

Introduction

Jusqu'ici on s'est servi de valeurs tabulées de constantes d'équilibre. On va ici réinvestir nos connaissances pour voir comment les déterminer.

C'est essentiel pour le chimiste, pour pouvoir prévoir le sens des réactions, l'équilibre, les réactions prépondérantes, la stabilité des espèces, ...

La méthode générale est d'utiliser $K^0 = Q_{\text{éq}}$, et de déterminer $Q_{\text{éq}}$ à l'aide d'une mesure de l'avancement (conductimétrie, pH-métrie, ...).

I - Par mesure directe de l'avancement

Dans ce cas, la mesure de l'avancement est souvent directement possible, à condition qu'il soit relié à une grandeur mesurable.

1 Par mesure de pH : cas de CH_3COOH .

Mesure de pH à un point (on utilise $pH = (pK_a + pC)/2$, assez précis : ± 0.06).

Mais c'est peu précis car on a $\log K_A$.

2 Par conductimétrie : CaSO_4 .

Attention, il y a environ 30% de paires d'ions, qui ne participent pas à la conductivité. Il est donc normal de trouver un chiffre non exact. Voir Daumarie. De plus, attendre longtemps que la saturation s'établisse.

3 Par dosage de l'état d'équilibre : cas d'un ester. JFLM2.

Faire l'ester avec montage à reflux, attendre longtemps pour que l'équilibre soit atteint, doser à froid (pour que l'estérification ne soit pas déplacée par le dosage).

II - Par suivi de réaction de titrage

Dans ce cas, l'une des espèces est ultra-minoritaire, et il faut un capteur logarithmique, souvent potentiométrique.

1 Titrage pH-métrique : reprise de l'acide éthanoïque, avec la méthode de Gran. (Attention, les espèces ne sont pas vraiment ultra-minoritaires.)

2 Sérum physiologique ou NaCl avec argentimétrie : remonter à K_s (et à E^0).

Remarques

Précision pH-mètre : 0.05, surtout à cause des solutions étalons (et de la dépendance en température). Voir remarques leçon 14.

LC 21 – Dosages suivis par potentiométrie (CP)

Plan

Manips :

- Titration cérimétrique du sel de Mohr (JFLM, Exp. de la famille redox).
- Titration argentimétrique du sérum physiologique (JFLM).
- Titration pH-métrique du vinaigre (JFLM).

Pré-requis :

- Oxydoréduction, formule de Nernst et mesure de potentiel.
- Acide/base, mesure de pH, titration colorimétrique (et notion d'équivalence).

Introduction

On a vu d'une part le principe d'un titrage pH-métrique ou redox *avec indicateur coloré*, et l'utilité de tels titrages pour le contrôle de qualité ;
d'autre part le principe de la mesure du potentiel d'une solution (grâce à la formule de Nernst + possibilité de mesurer le potentiel (électrode de référence)).

On va voir que le suivi du potentiel lors d'un titrage permet : de repérer l'équivalence précisément et/ou d'étudier une réaction (ici avec le sérum on remonte à K_s).

I - Principe du titrage potentiométrique et exemple

1 Définition et condition pour faire un titrage (total, unique, ...).

2 Titration cérimétrique du sel de Mohr, **manip.**

Réaction d'oxydoréduction, l'électrode prend le potentiel commun à tous.

Discuter qualitativement du saut, expliquer pourquoi on acidifie, etc.

Incertitudes.

II - Détermination de constantes, contrôle qualité

Double but : contrôle qualité et détermination de constantes.

1 Titration argentimétrique du sérum physiologique, **manip.**

Réaction de précipitation, l'électrode prend le potentiel de Ag et est le miroir de cette concentration.

Permet de remonter au K_s (sinon le suivi potentiométrique n'est pas vraiment justifié).

III - Titration pH-métrique, contrôle qualité

C'est un cas particulier important. C'est une électrode spécifique.

1 Titration du vinaigre par suivi de pH : **manip.**

Remarques

Sérum physiologique : pression osmotique nulle au contact du sang.

Ne pas fabriquer d'électrode au mercure (pas de mercure, interdit dans les lycées).

LC 22 – Cinétique homogène (CP)

Plan

Manips :

- Suivi spectrophotométrique de $2\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$.
- Suivi conductimétrique de tBuCl.

I - Vitesse de réaction, notion d'ordre

- 1 Vitesse de formation ou de disparition d'un constituant.
- 2 Vitesse volumique de réaction.
- 3 Ordre d'une réaction.
- 4 Exemples de facteurs cinétiques.

II - Détermination expérimentale d'un ordre

Il faut (i) une méthode de suivi de $v(t)$, (ii) des outils pour analyser les données. Cas d'un exemple.

On peut déjà énumérer des alternatives : méthodes chimiques (trempes) ou physiques (pression, potentiométrie, ...).

- 1 Suivi spectrophotométrique de $2\text{I}^- + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \text{I}_2 + \text{SO}_4^{2-}$: **manip**.
- 2 Présentation et utilisation de la méthode différentielle.
- 3 Présentation et utilisation de la méthode intégrale.
Qui est utile pour confirmer l'ordre précédemment trouvé.

III - Influence de la température

- 1 Loi d'Arrhénius. Interprétation rapide.
- 2 Mise en évidence expérimentale : **manip**, suivi conductimétrique de tBuCl... Attention : mettre le conductimètre sur calibre manuel.
- 3 Applications industrielles : c'est très important. Parler de l'ammoniac.

Conclusion et ouverture

Mentionner tout ce qu'on n'a pas dit : catalyse, radioactivité, ...

Remarques

On peut utiliser le logiciel Microméga qui montre des collisions...

Toutes les réactions n'admettent pas d'ordre. Il y a des ordres non fractionnaires.

Ex. de $\text{H}_2 + \text{Br}_2$ qui n'admet pas d'ordre, et de $\text{H}_2 + \text{I}_2$ qui est un acte élémentaire.

On peut suivre Van't Hoff sans être un acte élémentaire.

La réaction inverse d'un acte élémentaire est aussi un acte élémentaire.

Distinction microscopique/macroscopique

L. Martel : “En cinétique, il est indispensable de préciser si l’étude se réalise au niveau microscopique (au sens du chimiste) ou au niveau macroscopique. Par exemple, lorsque l’on trace un profil réactionnel, on se place au niveau microscopique. L’ordonnée est l’énergie potentielle d’un système qui comporte quelques atomes, voire quelques molécules. L’unité adaptée à de tels systèmes est l’eV. Les moyens actuels de simulation permettent des calculs des barrières énergétiques à franchir qui sont donc exprimées en eV. [A contrario], l’énergie d’activation E_A est une grandeur expérimentale, elle se situe au niveau macroscopique et s’exprime en kJ/mol. Plus la barrière énergétique à franchir au niveau microscopique est grande plus l’énergie d’activation est élevée. Mais il n’y a pas une simple relation de proportionnalité entre ces deux grandeurs.”

LC 23 – Évolution et équilibre chimique (CP)

Plan

Bibliographie : Tec&Doc PC et MP (nouveaux programmes).

Manips :

- Recristallisation (trioxalatoferate), JFLM.
- Dean-Stark, JFLM2.

Introduction

Buts : Prédire la composition à l'équilibre, prédire le sens d'évolution pour des CI données ou pour une perturbation de l'équilibre, déterminer quels paramètres font varier l'équilibre.

→ Afin d'optimiser le rendement.

Manip : solution de NaCl saturée. Ajouter du HCl : il se forme un précipité, bien que l'on fusse saturé.

I - Équilibre chimique et critère d'évolution

Suivre Grecias PC.

1 Sens d'évolution spontanée

Définir l'activité, montrer qu'avec le 2nd ppe on a un critère (attention, ne pas parler d'affinité qui n'est plus au programme, mais juste de $\Delta_r G$).

2 Équilibre chimique, facteur d'équilibre

Définition d'équilibre chimique, de facteur cinétique, de rupture d'équilibre.

Importance de la variance pour déterminer les paramètres sur lesquels on peut jouer.

Critère sur le quotient réactionnel, loi de modération.

II - Optimisation de la température et de la pression

1 Température (à P fixé)

Manip : recristallisation. Illustre que changer T déplace l'équilibre, et qu'on peut s'en servir.

2 Pression (à T fixé)

3 Application industrielle : synthèse de l'ammoniac

Suivre Grecias MP nouveau programme.

4 Constituant inerte (si temps)

Exemple du vapocraquage des hydrocarbures : ajout de $H_2O_{(g)}$.

III - Optimisation des paramètres chimiques

1 Ajout d'un réactif

Avec explication de la manip d'intro.

2 Retrait d'un produit

Manip : montage Dean-Stark. Calcul du rendement.

 **Remarques**

On peut aussi faire la Manip de la seringue avec 2NO_2 donne N_2O_4 (BUP).

LC 24 – Optimisation de synthèses industrielles (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PCSI nouveau programme.
- Grecias MP nouveau programme : l'ammoniac en étude de documents.
- Durupthy ou Mallet, chimie des matériaux inorganiques : le zinc.
- BUP 770 zinc.
- Technique de l'ingénieur j5800 sur l'estérification.
- Technique de l'ingénieur j6135 sur l'ammoniac.
- Livre TS avec ester de groseille.

Manips :

- Hydrométallurgie du zinc.

I - Facteurs d'optimisation

Partie dans l'esprit de "stratégies en synthèse organique (L)".

1 Cas de la synthèse de l'ammoniac

Discuter : exothermique, donc T bas favorise la thermodynamique, mais pas trop sinon la cinétique est lente.

Rôle de la pression car la $\sum_{\nu_i \text{ gaz}} \neq 0$.

2 Coût, environnement

Montrer le livre de TS avec l'ester de groseille. Notion de coût, d'environnement, ...

Déplacement d'équilibre, ...

Voir le technique de l'ingénieur j5800.

II - Hydrométallurgie du zinc

Avec plein d'étapes et de manips...

Remarques

Sur le plan

On pourrait aussi faire des manips avec les esters (micro-onde ou rhum à reflux, purification et mesure du rendement, puis Dean-Stark et rendement avec le volume d'eau produite). Puis en II parler de l'ammoniac, et ainsi oublier le zinc.

Leçon présentée en 2014 : estérification et polymérisation.

Manip : estérification à reflux, estérification avec Dean-Stark, polymères.

La motivation est que certaines polymérisations sont des estérifications (ou des transestérifications) dans le cas des polyesters.

Le procédé chlore-soude

Électrolyse d'une solution aqueuse de NaCl.

Produit $\text{Cl}_{2(g)}$ et $\text{H}_{2(g)}$ et NaOH. Un tiers du dichlore est ensuite utilisé pour fabriquer du PVC

(puis 10% pour la pâte à papier, 5% pour le traitement de l'eau, ...).

On peut la réaliser (JFLM1) et tracer la courbe $i = f(E)$.

Produit également de la soude NaOH, qu'on utilise par ailleurs.

Challenge : l'oxydation de l'eau est thermodynamiquement plus simple que celle du chlore. Il faut donc un métal avec une surtension suffisante (anode en graphite, maintenant remplacée par une anode en titane recouverte d'un revêtement catalysant la réaction d'oxydation).

Autre challenge : les ions HO^- réagissent avec le Cl_2 pour former ClO^- . Il faut donc séparer les deux compartiments, avec une membrane spéciale, etc... (ou alors cathode en mercure qui fait que l'on ne forme pas HO^- ...).

De façon générale, une électrolyse est une réaction forcée, donc la réaction inverse est thermodynamiquement favorisée, et il faut empêcher les produits de se rencontrer (compartiments différents, ou membrane). C'est le cas par exemple dans la production du sodium métallique.

Production de métaux par électrosynthèse

Challenge : le potentiel du couple métal / ion métallique est souvent en dessous de celui de l'eau. Il faut donc soit utiliser une électrode avec surtension, soit ne pas travailler dans l'eau mais dans un sel fondu (cas du sodium ou de l'aluminium).

Exemple de l'électroaffinage du cuivre (JFLM2). On se débarrasse des impuretés par électrolyse, en jouant sur les potentiels et surtensions. On se débarrasse entre autres d'argent et d'or, qui se déposent au fond du bassin (ils ne sont pas oxydés), et qu'on récupère ensuite. On produit ainsi 80% de l'argent et 15% de l'or mondial.

Synthèse de l'ammoniac

Procédé industriel Haber à 400°C.

$\text{N}_{2(g)} + 3\text{H}_{2(g)} = 2\text{NH}_{3(g)}$, où N_2 est obtenu par distillation de l'air liquide, et H_2 comme sous produit du vapocraquage des hydrocarbures (ou aussi du procédé chlore-soude).

Plus grosse synthèse industrielle. Utilité : acide nitrique, industrie des engrais.

Acide sulfurique

Une des plus grosses synthèses industrielles.

Hydrométallurgie du zinc

10 millions de tonnes par an, utilisées pour la protection contre la corrosion (galvanisation), fabrication du laiton et d'autres alliages.

1. Grillage : transformation de la blende ZnS en ZnO (calcine). On enlève le soufre car dans le métal il formerait des liaisons S-S cassantes.
2. Lixiviation acide : attaque du minerai par une solution aqueuse. (Lixiviation = mise en solution.) Ici dissolution à l'aide d'acide sulfurique de la calcine (on obtient des ions Zn^{2+} , des impuretés Fe^{3+} , Cu^{2+} , ...).
3. Lixiviation neutre : précipitation des ions Fe^{3+} sous forme $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$, puis filtration (avec ajout préalable de ... car sinon $\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)}$ est trop pâteux et bouche le filtre).
4. Cémentation : réduction d'un cation métallique par ajout d'un métal. Ici de Cu^{2+} par ajout de poudre de Zn. Filtration.

5. Électrolyse : possible car plus que Zn^{2+} , H^+ , SO_4^{2-} , et ions métalliques avec un E en dessous de celui du zinc.

LC 25 – Diagrammes potentiel-pH (construction exclue) (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PCSI nouveau programme, Fosset PCSI.
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques.
- BUP 770.
- JFLM.

Manips :

- Lixiviation de la calcine (hydrométallurgie Zn) (et tests de présence des ions fer III) (BUP 770).
- Mesure de solubilité de O₂ dans l'eau (méthode de Winkler) (JFLM).

Pré-requis : oxydoréduction, acide-base, précipitation, complexation.

Introduction

Réaction a/b et redox ne sont pas indépendantes. Aspect thermodynamique seulement.

Trois points clés : d'un diagramme E-pH, on déduit des constantes thermodynamiques, on prévoit des réactions (extension de la règle du γ), et applications industrielles et analytiques.

I - Principe de lecture, données thermodynamiques

Définition : dans le plan E-pH, zone de prédominance ou d'existence des composés d'un même élément.

1 Structure d'un diagramme E-pH

Frontières horizontales (ex. de l'eau), verticales, conventions de tracé aux frontières.

2 Exploitation pour en déduire des constantes thermodynamiques

Ex. de Zn.

3 Exploitation : prédire des réactions

L'eau : domaine de stabilité ; cas avec dismutation (Cl₂) ; stabilité des espèces dans l'eau.

II - Application analytique : dosage de O₂ dans l'eau

JFLM1, exo dans le Tec&Doc. Doser O₂ dans l'eau implique qu'on en déduit la présence ou non de micro-organismes.

III - Application industrielle : hydrométallurgie du zinc

Partie sur la lixiviation.

Conclusion et ouverture

Ouvrir sur la corrosion humide, la cinétique.

 **Remarques**

On peut montrer peu de manip. Par ex. juste le dosage de Winkler et deux filtrations pour Zn.

LC 26 – Corrosion humide des métaux (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PC nouveau programme, Tout en un MP nouveau programme.
- JFLM.
- Sarazin : l'oxydoréduction (pour toutes les manip).
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques.

Manips :

- Intro : Zn et Cu dans HCl : l'un est attaqué, pas l'autre (Sarazin).
- Idem plus tard avec Fe, Cu, Pb et Zn (Sarazin).
- Ensuite, corrosion électrochimique : mettre en contact des métaux, avec ampèremètre ou pas.
- Protection : Les clous dans l'agar-agar, avec boîte de Pétris ou tube à essai ; éventuellement protection du fer par imposition de E (Sarazin).

Pré-requis : Oxydoréduction, piles, diagrammes E-pH, courbes intensité-potentiel.

Introduction

Zn et Cu dans HCl : l'un corrodé, pas l'autre. Pourquoi ? Définir corrosion, donner les types de corrosion et les facteurs a priori (sèche, humide, homogène, électrochimique).

I - Corrosion chimique

Manip : Zn, Mg, Pb, Pt dans HCl : certains s'expliquent par la thermo, d'autres non.

1 Principe : schéma avec des électrons qui bougent.

2 Aspect thermodynamique (diagrammes E-pH).

Domaines de corrosion, de passivation. Le cas du fer (qui est important).

Expliquer la manip.

3 Aspect cinétique (courbes $i(E)$).

Expliquer la manip.

Transition : **manip** précédente, mais en mettant en contact les métaux. Fer et platine par exemple : oxydation ! mettre un ampèremètre : les électrons viennent du fer, qui donc s'oxyde.

II - Corrosion électrochimique

1 Micropiles. Explication de la manip avec les courbes $i(E)$. Noter les surtensions, qui sont des barrières d'activation (lenteur du transfert d'électrons à la surface du métal).

Remarquer que le potentiel des deux métaux est le même (pas de chute ohmique).

III - Facteurs de corrosion, protection

Manip : clous dans l'agar-agar, aération différentielle.

1 Écrouissage

2 Influence du pH

Manip : mesure du courant pour des mêmes électrodes dans HCl, dans de l'eau, ...

3 Aération différentielle

4 Protection par anode sacrificielle

5 Protection par mise à un potentiel imposé

À chaque fois, insister sur les conséquences pratiques dans la vraie vie.

Conclusion et ouverture

Insister sur l'importance de l'impact de la corrosion (en nombre de tonnes de fer oxydé par an par exemple).

LC 27 – Stéréochimie (CP)

Plan

Bibliographie : JFLM2, Tec&Doc PCSI, TS Hachette (pour des exemples et le tableau récapitulatif).

Manips :

- Odeur du limonène.
- Modèles moléculaires.
- Acides fumariques, maléiques : dosage, banc Kofler.
- Acide tartrique : banc Kofler.
- Rotation saccharose.

Niveau : CPGE 1ère année, pré-requis :

- Isomérisation de constitution.
- VSEPR.
- Représentation de Newman, de Cram.
- Règles CIP.

Rq : on ne parle pas de stéréoisomérisation dynamique (mais on pourrait).

Introduction

Donner des exemples : les composés odorants (**manip** : faire sentir), les médicaments (la thalidomide, JFLM1), l'acide tartrique (Pasteur).

But : donner les outils de base pour comprendre tout ça.

I - Stéréoisomérisation de conformation

Comparaison $k_B T$ et 3-30 kJ/mol. Dicté par les interactions électrostatiques entre nuages électroniques.

1 Notions de conformère

2 Cas de l'éthane (éclipsée, décalée), **puis du butane** (éclipsée syn, décalée gauche, éclipsée anti, décalée anti).

3 Cas du cyclohexane : seulement si on est en avance, sinon plutôt non (mais le dire).

II - Stéréoisomérisation de configuration

But : comprendre et décrire, puis étudier les différences entre stéréoisomères configurationnels. Possibilité de les distinguer, de les séparer ?

1 Origine de la stéréoisomérisation de configuration : éléments stéréogènes

- Z et E (vu au lycée)
- R et S

2 Définition de diastéréoisomères et énantiomères

3 Propriétés distinguant des diastéréoisomères

Acides fumariques et maléiques : point de fusion au banc Kofler, dosage et constante d'acidité (**manip**)

4 Propriétés distinguant des énantiomères

Propriétés physiques et chimiques identiques : on peut le montrer sur l'acide tartrique (**manip**, banc Kofler si temps).

Définition de la chiralité. Mise en évidence du pouvoir rotatoire du saccharose (**manip** : en préparation, le faire sur 3 concentrations, montrer la dépendance en λ avec deux lasers).

Conclusion et ouverture

Parler de l'importance dans le vivant, les médicaments.
Parler de stéréoisométrie dynamique, de stéréosélectivité.

Remarques

Attention : on ne peut pas associer de façon univoque carbone asymétrique et chiralité. Un méso-achiral possède deux (ou plus) carbones asymétriques, et est achiral ; dans l'autre sens, il y a des molécules chirales sans carbones asymétriques (les allènes par exemple, dont les deux plans de liaisons doubles sont toujours orthogonaux, exemple : penta-2,3-diène).

Attention encore : la chiralité est une propriété intrinsèque à une et une seule molécule ; l'énantiométrie est une relation entre deux molécules.

La nomenclature R et S est basée sur les règles de Cahn, Ingold et Prelog. La nomenclature D/L utilisée pour les oses n'a aucun lien avec la R/S ; elle est basée sur la position (droite ou gauche) du dernier groupement OH dans la représentation de Fischer. De plus, que ce soit pour R/S ou D/L, il n'y a aucune relation avec le caractère (+) ou (-).

LC 28 – Conversion réciproque d'énergie électrique en énergie chimique (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PC nouveau programme.
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques.
- Grecias MP nouveau programme : accumulateur au plomb.
- Fosset PSI : accumulateur au plomb.

Manips :

- Pile Daniell (juste pour illustrer) (JFLM1).
- Électrolyse du zinc.
- Accumulateur au plomb (JFLM1 ou Florilège plus simple mais c'est tricher, si temps car ça paraît long déjà...).

Niveau CPGE 2ème année, pré-requis :

- Oxydoréduction, cellules électrochimiques, Nernst.
- Thermochimie.
- Courbe $i = f(E)$.
- Diagrammes E-pH.

Introduction

Appareils mobiles électriques : il faut soit produire sur place l'électricité, soit la transporter.

Analogie avec la combustion des voitures : chimique \rightarrow thermique \rightarrow mécanique

I - Thermodynamique redox

But : voir ce qu'indique la thermodynamique.

1 Cellule électrochimique (rappels)

2 Lien entre force électromotrice et enthalpie libre de réaction

Démo de $dG = \delta W_{el}$, puis de $\Delta_r G = -nF e_{pile}$, $nF e_{pile} = -RT \ln Q_r / K^0 > 0$ tant que $Q_r < K^0$.

Dire qu'on déduit K^0 des E^0 , et qu'on pourrait démontrer la formule de Nernst.

II - Conversion chimique vers électrique : les piles

1 Exemple de la pile Daniell

À illustrer avec la [manip.](#)

K^0 , puis la capacité en coulombs et en Ah.

2 Autres types de piles

Combustible, alcaline, bouton au lithium.

III - Conversion réciproque

Comment trouve-t-on les métaux réduits qui composent les piles ? le zinc par exemple ?

1 Électrolyse

Cas de l'eau (si temps).

Cas du zinc : **manip**, explication avec les surtensions, etc. $U_{\text{imposé}} = U_{\text{min}} + U_{\text{surtension}} + ri$.

C'est la dernière étape de l'hydrométallurgie du zinc.

On produit donc Zn pour ensuite en faire des piles.

2 Accumulateurs : un dispositif tout-en-un.

Manip de l'accumulateur au plomb (si temps).

Suivre JFLM1. Relever u aux bornes de l'accumulateur et i (résistance de $\sim 30\Omega$), à la charge ET à la décharge. On peut ensuite faire le rendement faradique et énergétique.

Charge sous 4 V.

Conclusion et ouverture

Importance actuelle (voitures électriques, pile à combustible car H_2 est facilement transportable), ...

Remarques

Tec&Doc PC : capacité massique des piles au Li, Cd, ... (dans un exo) : intéressant.
Aussi : diagramme E-pH du plomb en milieu sulfurique.

Pile : on doit séparer les compartiments pour récupérer le courant (sinon ça produit juste de la chaleur).

Électrolyse : c'est aussi souvent le cas, sinon les espèces produites réagissent à nouveau entre-elles.

Électrolyse de l'eau : JFLM p187. On peut aussi le faire dans un tube en U et mettre un indicateur de pH universel (cf fiche électrochimie de JFLM).

LC 29 – Solubilité (CP)

Plan

Bibliographie :

- JFLM1 pour les manip et le texte.
- Tec&Doc Grecias PCSI et Fosset PCSI.
- Mesplède chimie organique.
- Daumarie : CaSO_4 .
- MPSI nouveau programme : pour parler d'environnement.

Manips :

- Dosage argentimétrique du sérum physiologique (JFLM).
- Sel dans l'eau et dans le cyclohexane.
- Application à une recristallisation : trioxalate de potassium (JFLM).
- Constante de solubilité de CaSO_4 .

Introduction

(Fosset MPSI) On s'intéresse à l'équilibre hétérogène entre un solide et une espèce en solution.

Rq : ceci exclu l'étude de réaction de type partage entre deux solvants d'un même composé (le diiode par exemple), ou la solubilité de tel solvant avec tel autre (l'éthanol dans l'eau par exemple). On pourrait probablement en parler.

I - Notions générales

1 Produit de solubilité

2 Solubilité, diagramme d'existence

3 Détermination d'un K_s : Dosage argentimétrique du sérum physiologique : ça précipite, on peut en déduire K_s (manip).

II - Facteurs influençant la solubilité

1 Facteurs : solvant, T, pH, ...

Manip avec du sel dans l'eau et dans du cyclohexane.

III - Application à une synthèse organique

Recristallisation du trioxaloferrate de potassium.

Conclusion

Deux mots obligatoires sur l'écologie (programme de MPSI) : dépollution des eaux usagées (on passe en milieu basique, ce qui fait précipiter les ions métalliques), ou bien le rejet d'eau chaude dans les rivières entraîne un dégazage quand elles se refroidissent.

Remarques

Généralités

La solubilité peut être affectée par la présence d'ions communs, mais aussi par le pH ou par complexation. Par exemple le calcaire CaCO_3 est plus soluble en milieu acide, car CO_3^{2-} est protoné en HCO_3^- , et ne participe donc pas complètement au produit de solubilité.

De façon plus générale, la solubilité relève des interactions entre le composé et le solvant. Toute espèce présente dans le solvant (en quantité suffisante) peut donc modifier la solubilité.

Il existe des composés plus soluble à froid : les gaz, le calcaire. Leur dissolution est exothermique (c'est aussi le cas de NaOH et de H_2SO_4). D'autres ont une dissolution athermique (NaCl), et d'autres endothermique (ils sont alors plus soluble à chaud qu'à froid). Attention, T joue aussi sur la cinétique.

L'éthanol ou l'acétone sont infiniment solubles dans l'eau. Il existe des composés qui ne se dissolvent pas dans l'eau.

La pression influe également sur la solubilité des gaz : plus elle est élevée, plus les gaz sont solubles. Ainsi lorsque l'on ouvre une bouteille d'eau gazeuse il y a une chute de pression (passage de la pression avant ouverture à la pression atmosphérique), donc une baisse de solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau, donc un dégazage soudain (on s'en rend bien compte, c'est l'apparition de bulles). Le même mécanisme est à l'œuvre dans une éruption volcanique : le magma est riche en composés gazeux dissous, et lorsqu'il remonte dans la cheminée du volcan la pression diminue, donc la solubilité aussi, il y a alors formation de grands volumes de gaz plus ou moins piégés dans le magma selon la viscosité de celui-ci. Il en résulte une éjection rapide de tout ceci.

Iode

I_2 est très peu soluble dans l'eau (mais par contre il est très soluble dans des composés organiques). On peut augmenter sa solubilité en ajoutant du I^- (souvent par ajout de KI , voir épreuve B 2011, B.3), pour former le complexe I_3^- , chargé et donc soluble. De façon générale, il faudrait toujours raisonner avec I_3^- en solution aqueuse (cf par exemple épreuve B 2013). Attention, l'iode dans I_3^- est donc de degré d'oxydation 0.

Couleurs : violet en solvant organique apolaire, car il est peu solvaté, interagit peu, et à la même couleur que sous forme gazeuse. Dans l'eau (ou un solvant polaire), les liaisons avec les doublets de l'oxygène changent les niveaux d'énergie et donc la couleur perçue.

Alternatives

Si le dosage argentimétrique ne marche pas :

— Dosage par précipitation : méthode de Mohr (manip : titrage de Cl^- de St Yorre).

LC 30 – Cinétique électrochimique (CP)

Plan

Bibliographie :

- Grecias PC nouveau programme, Fosset PC.
- Brenon-Audat : courbes $i(E)$.
- Durupthy, chimie des matériaux inorganiques.
- Fosset PSI : accumulateur au plomb.
- Sarazin : corrosion.

Manips :

- Intro : Zn et Cu dans HCl : l'un est attaqué, pas l'autre (Sarazin).
- Courbes $i = f(E)$ pour $\text{Fe}^{\text{III}}/\text{Fe}^{\text{II}}$ et pour $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ (en direct) (Brenon Audat, montages de chimie inorganique et générale).
- Accumulateur au plomb (à discuter quoiqu'il en soit).
- Électrolyse du zinc (Durupthy, JFLM, Sarazin).

Introduction

Jusqu'ici : thermodynamique. Nécessité de prendre en compte la cinétique. **Manip** identique à celle de la corrosion : Pb, Fe, Cu, Zn dans de l'acide.

But : comprendre ceci. Voir les inconvénients que ça amène, et les avantages qu'on peut en tirer.

Points importants :

- Le courant est une mesure de la vitesse de réaction.
- Avantages et inconvénients des surtensions : désavantage pour les recharges de batteries, avantage pour certaines réactions (dans l'accumulateur au Pb par ex., on peut le recharger sans électrolyser l'eau grâce à la surtension, idem avec l'électrolyse de NaCl).

I - Cinétique des réactions électrochimiques

On suit le plan du Tec&Doc ou de Durupthy.

1 Lien vitesse de réaction-intensité

2 Courbes intensité-potentiel

3 Systèmes rapides et lents

4 Palier de diffusion, mur du solvant

Avec la **manip** de tracé de courbes, en direct pour l'eau, où on illustre tout ça.

II - Transformations spontanées : potentiel mixte

Potentiel mixte (qui est le potentiel de Nernst) entre deux couples. Permet de prédire la vitesse de réaction par lecture du courant. Noter que la forme des courbes dépend des concentrations, et que la courbe totale est la somme de celle anodique et cathodique.

Manip identique à celle de la corrosion : Pb, Fe, Cu, Zn dans de l'acide et explications.

III - Piles et électrolyses

1 Hydrométallurgie du zinc, **manip.** BUP 770.

2 Batterie au plomb

Conclusion et ouverture

Vers la corrosion, ...

Remarques

- Pour tout ce qui est mesure de V et I dans les piles/électrolyses/etc : ne PAS AGITER (ça ajoute de la convection turbulente, modifie les courbes $i = f(E)$, tue le palier de diffusion qui est contrôlé par la diffusion, ...). De plus, pour être dans l'hypothèse d'un palier régi par la diffusion, on se place toujours dans une solution avec des ions spectateurs concentrés, qui assurent la conduction en solution (sinon elle serait assurée par les espèces réduites/oxydées aux électrodes : courant de migration).
- Tracé de courbe $i = f(E)$: sans potentiostat (que l'on n'a pas), les mesures de i ne sont pas reproductibles : dérive, car concentration changeante, ...
→ faire les courbes à la volé, assez vite, sans revenir en arrière.
- Ne jamais faire passer un courant par une électrode de référence. Elle ne donne un potentiel correct qu'à $i = 0$ avec la formule de Nernst.
- Si on court-circuite une pile, i_{limite} est donné par la résistance du pont ionique et des autres éléments du circuit de court-circuit.

Remarques sur les manipulations

Encore une fois, ces remarques sont à prendre avec du recul...

Évaporateur rotatif

Pour l'éther, environ 0.650 bar et 35°C.

Jamais de graisse.

La garde bizarre sert à protéger le dispositif en cas de cassure du vide (le produit dans le ballon partirait violemment dans la tuyauterie).

Ampoule de coulée (à décanter)

Jamais de graisse sur le bouchon : ça en mettrait sur le produit quand on remplit/agite. Plutôt trouver un bouchon adéquat pour que ça ne fuit pas.

Recristallisation

Ne pas mettre de graisse au moins sur une des sorties, pour pouvoir verser le produit sans passer par de la graisse.

Agiter. Mais enlever le barreau avant recristallisation.

Ne pas refroidir brutalement dans la glace, car sinon gros cristaux qui piègent des impuretés.

Filtre Büchner

Vide un moment, taponner (essorage) ou pas, casser le vide, rincer, triturer avec tige de verre, et attendre 30s, remettre le vide et taponner.

Paraffine pour essorer : pourquoi pas.

Porosité des filtres : un grand nombre implique de petits trous.

Conductimétrie

Mesure de la conductance d'une colonne d'électrolyte entre deux plaques de platine. $G \sim 500$ mS. Tension de 50 à 500 mV (pas plus pour éviter toute électrolyse). Alternatif ($f \sim$ kHz), car sinon il y a accumulation de charges sur les électrodes jusqu'à écranter la tension et plus rien ne se passe. Il faut donc f assez élevée pour que ce condensateur se résume à un fil ($f > 1/RC$, donc augmente avec la conductance).

pH-métrie

On mesure le pH en mesurant la ddp entre une électrode de référence externe et une interne à l'électrode de verre. Il apparaît une ddp entre les deux faces de la membrane de verre de l'électrode, qui est proportionnelle à la différence d'activité des ions H^+ des deux côtés. La concentration coté intérieur étant constante, on en déduit la concentration coté solution. Voir Rouessac et Asch.

Précision : Deux chiffres significatifs (3 si on est optimiste), pas plus. Incertitude qui vient souvent de la solution tampon qui sert à étalonner, typiquement ± 0.05 u.pH (voir Hachette TS, ou la notice des solutions tampons).

Ceci implique une incertitude plus grosse encore sur $[\text{H}_3\text{O}^+]$, qu'on écrit avec un chiffre significatif de moins que le pH.

La force ionique $I = 0.5 \sum c_i z_i^2$ est une mesure de la concentration totale en ions. Elle influe sur l'activité des espèces, qui est égale à $a_i = \gamma_i c_i$, avec $\gamma_i(I)$ selon certains modèles.

Mesure de potentiel et courant sur une pile

- Ne pas agiter (ça ajoute de la convection turbulente, modifie les courbes $i = f(E)$, tue le palier de diffusion qui est contrôlé par la diffusion, ...).
- Tracé de courbe $i = f(E)$: sans potentiostat (que l'on n'a pas), les mesures de i ne sont pas reproductibles : dérive, car concentration changeante, ...
→ faire les courbes à la volé, assez vite, sans revenir en arrière.
- Ne jamais faire passer un courant par une électrode de référence. Elle ne donne un potentiel correct qu'à $i = 0$ avec la formule de Nernst.

Dean-Stark

Quand il y a de l'eau et un solvant moins dense que l'eau et non miscible. Eau + solvant donne un diagramme binaire à hétéroazéotrope. Le mélange s'évapore à T_H avec la composition x_H . (En toute rigueur, le diagramme à considérer n'est pas binaire mais implique aussi l'alcool et l'acide carboxylique (miscibles avec l'eau et le solvant organique).) Pour une estérification, on utilise typiquement comme solvant le cyclohexane, et $T_H \sim 70^\circ\text{C}$.

Dans le tube gradué, le solvant plus léger surnage et retombe dans le mélange réactionnel : on n'enlève donc que l'eau.

L'avantage de faire retomber le solvant est que s'évaporent aussi des réactifs, qui se retrouvent dans le solvant organique plutôt que dans l'eau, et qui retournent donc dans le ballon (avec une hydrodistillation on perd cet avantage).

Hydrodistillation (ou entraînement à la vapeur d'eau)

On met de l'eau en excès dans un produit A non miscible : diagramme à hétéroazéotrope, et évaporation à $T_H < 100^\circ\text{C}$ et à x_H . Permet soit de purifier, soit de se débarrasser de l'eau et du produit avec le plus bas T_H pour déplacer un équilibre par exemple.

L'intérêt est que l'ajout d'eau permet d'avoir un $T_H < 100^\circ\text{C}$.

Pour une estérification, si l'on compare avec le Dean-Stark, c'est la même chose sauf qu'avec le Dean-Stark le solvant retombe dans le ballon.

Distillation fractionnée

Avec colonne de Vigreux. Pour un mélange miscible. Le distillat est le composé le plus volatil, qui peut être l'homoazéotrope le cas échéant. Le résidu est l'autre composé dans le lobe correspondant.

S'il y a plus de deux composés, il faudrait faire un diagramme ternaire... Le bilan est que le distillat est le plus volatil.

Contrôler la température en tête de colonne : si elle change on a épuisé le composé volatil.

Banc Köfler

Ne pas nettoyer à l'éthanol : l'évaporation de celui-ci est endothermique et dérègle le banc. Pousser les échantillons avec du coton vers l'extérieur.

Produit P avec impureté I : diagramme à eutectique (solides non miscibles - liquides miscibles). Lorsque l'on chauffe, on atteint T_E , où toute l'impureté fond (mais il y en a peu alors ça ne se voit pas). On a alors juste après T_E un mélange $I_l + P_s$. Puis on continue de chauffer : on liquéfie P . La fusion se termine pour une température T inférieure à $T_{\text{fusion } P \text{ seul}}$.

Donc la température de fusion avec impuretés est inférieure à celle du produit pur.

C'est identique dans le cas de l'eau : avec du sel la température de fusion de la glace est diminuée. (Rq : D'autre part, avec l'eau salée, la température d'ébullition augmente, donc en fait la gamme de stabilité de l'eau liquide augmente des deux cotés. C'est parce qu'il se forme des liaisons eau-sel qui sont très fortes, et donc qui abaissent l'énergie du liquide.)

Mélange eau-glace-sel réfrigérant

(Voir aussi banc Köfler.)

Mettre du sel dans un mélange eau-glace abaisse sa température. Ceci est dû au fait que la fonte de la glace est endothermique (et dans une moindre mesure la solubilisation du sel). Si le mélange se fait de façon adiabatique, alors la température est abaissée.

D'ailleurs, s'il y a assez de sel et toujours de la glace pour avoir un équilibre eau salée - glace, alors on est à l'eutectique, et donc $T \sim -15^\circ\text{C}$.

Spectrophotomètre à absorption UV-visible

On se met au maximum d'absorption, car c'est un extremum ($dA/d\lambda = 0$), donc l'absorbance varie peu en fonction de λ et les erreurs sur les longueurs d'onde produites par l'appareil ont moins de conséquences ; et parce qu'on a la loi $A = kC$ où C est la concentration, qui est plus précise si le coefficient directeur k est grand, donc si l'absorbance est plus élevée.

Pour produire une lumière entre 200 et 800 nm, il y a deux lampes : une lampe à décharge au deutérium, et une lampe à filament de tungstène. Le passage de l'une à l'autre lors d'un balayage peut parfois donner lieu à une rupture de courbe (à 350 nm).

Attention aux cuves en plastique ou polymère, elles peuvent être attaquées par les solvants organiques.

Index

- Écoulement
 - laminaire, 46
 - rampant, 46
 - tourbillonnaire, 46
 - turbulent, 46
- Écoulement de Poiseuille, 45
- Élément chimique, 302
- Électron élastiquement lié
 - non linéarités, 238
- Électronégativité, 297
- Émetteur ultrason, 252
- Équation de la chaleur, 87
- Équilibre radiatif, 82
- Équilibre thermodynamique, 64
- État métastable, 80
- Étendue optique, 90
- Évaporation, 78, 81

- Aberrations optiques, 168
- Acoustique, 149
- Aimant néodyme, 116
- Aimants, 111
- Aire cycle, 74
- Analyse dimensionnelle, 38
- AO
 - modèle du premier ordre, 231
- Aplanétisme, 168
- Atmosphère, 64
 - stabilité, 90
- Atténuation ondes sonores, 138

- Banc hyperfréquence, 228
- Beer-Lambert, 177
- Birefringence, 182
- Bobine, 124

- Cable coaxial, 144
- Capteur, 242
- Cauchy-Lipschitz, 240
- Causalité
 - et transformation de Lorentz, 41
 - et vitesse de groupe, 141
- Cavité Fabry-Pérot, 260
- Cavitation, 48
- Chaleur spécifique des solides, 213, 216
 - anharmonicité, 238
- Champ moyen, 218
- Cohérence, 155
- Collisions et détermination des trajectoires, 35
- Colpitts, 254
- Condensateur, 120

- Conditions limites tuyau ouvert, 138
- Conduction dans les métaux, 221
- Constante de Lorenz, 224
- Constantes, 71
- Convection
 - Rayleigh-Benard, 90
- Corde de Melde, 259
- Corps noir, 82
 - conditions d'équilibre, 84
 - pourquoi un spectre continu?, 85
- Corps pur, 301
- Couleur des matériaux, 103
- Coupure GZK, 43
- Critère de Barkhausen, 230
- CTN et CTP, 228
- Curie
 - Principe, 37
- Cycles thermodynamiques et rendement, 74

- Décalage de Lamb, 197
- Dalton, 303
- Diélectrique
 - réflexion totale, 103
- Diamagnétisme, 111, 218
- Diapason, 149
- Diffraction, 161
- Diffusion de Mie, 106
- Diffusion de Rayleigh, 106
- Diode (DEL), 188
- Diode Gunn, 228
- Diode laser, 169, 188
- Diode Schottky, 227

- Effet Compton, 35, 43
- Effet de peau, 105
- Effet Doppler, 149, 242
- Effet Faraday, 118
- Effet Hall, 226
- Effet Magnus, 49
- Effet Pelletier, 92
- Effet Seebeck, 92
- Effet Thomson, 92
- Effets thermoélectriques, 92
- Einstein et de Haas, 31
- Ensemble canonique, 212
- Entité moléculaire, 302
- Entrefer, 111
- Entropie, 69–71
- Erreur de quantification, 248
- Espèce chimique, 302

- Fermat, 153
- Ferromagnétisme, 111, 218
- Fibre optique, 145
- Filtre
 - ordre, 234
- Filtre interférentiel, 159
- Fluorescence, 178, 189
- Fonctions et variables d'état, 68
- Force de traînée, de portance, 48
- Force nucléaire, 202
- Formation d'images, 169
- Frottement
 - de pivotement et de roulement, 24
 - interprétation microscopique, 25
 - limites de la loi de Coulomb, 25
 - point d'application de la résultante, 25
- Goniomètre, 174
- GPS, 141
- Graphite pyrolytique, 118
- Gyroscope, 30
 - toupie et frottements, 31
- Hall (résistance), 221
- Hartree-Fock, 209
- Henry, 303
- Huygens-Fresnel
 - démonstration, 163
 - validité, 163
- Impédances
 - d'entrée et de sortie, 231
- Inégalités de Bell, 191
- Indépendance ou équivalence du RFD, TEC, TMC, 36
- Inductance, 111, 124
- Induction
 - de Lorentz, 100
 - de Neumann, 99
- Intégrale d'échange, 218
- Interaction forte, 202
- Klechkowski, 210
- Kramers-Kronig, 103
- Lampe spectrale, 169
- Laser, 169, 187
- Métastable (état), 80
- Marées, 28
- Michelson, 172
- Micro, 149
- Modèle de Debye, 216
- Modèle de Drude, 221
- Modèle de Sommerfeld, 221
- Mode
 - définition, 135
- Modes propres, 236
- Modes propres de la Terre, 136
- Navier-Stokes
 - compressible, 46
- Onde
 - définition, 133
 - définition OS, OP, OPPH, etc, 135
- Opalescence critique, 80, 94
- orbitales moléculaires, 210
- Paradoxe de d'Alembert, 48
- Paradoxe des jumeaux, 40
- Paramagnétisme, 111, 218
- Pas de quantification, 248
- Pelletier, 92
- Pendule de Newton, 36
- pertes fer, 129
- Phénomène de transport
 - définition, 86
- Phase, 301
 - définition, 94
- Phosphorescence, 189
- Photodiode, 180
- Photorésistance, 180, 227
- Piézoélectrique, 102, 252
- Poincaré Bendixson, 240
- Point critique, 80, 94
- Polarisation, 184
- Polariseur
 - à grille métallique, 163, 185
 - dichroïque, 185
- Poussée d'Archimède, 50
- Pouvoir rotatoire, 182
- Premier principe système ouvert, 74
- Pression, 46
- Pression osmotique, 303
- Principe de Curie, 37
- Principe de Fermat, 153
- Processus à trois corps, 43
- Produit gain bande passante, 231
- Pyromètre optique, 177
- Quartz, 254, 260
 - montre, 255
 - oscillateur, 231
- Quartz-iode, 168
- Quasi-statique, 65
- Référentiel
 - définition, 39
- Régulateur de Watt, 229
- Réseau
 - forme et structure, 165
 - résolution, 165
- Réseau blazé, 164, 165
- Résistance de Hall, 226
- Résonance, 236
- Réversible, 65
- Radar routier, 234
- Raoult, 303
- Recalescence du fer, 95
- Relations de Kramers-Kronig, 103

RMN, [32](#), [206](#)

Série et transformée de Fourier, [233](#)

Seconde harmonique, [239](#)

Seebeck, [92](#)

Semi-conducteur, [226](#)

Sondes (oscilloscope), [121](#)

Sources lumineuses, [168](#)

Stigmatisme et aberrations, [168](#)

Structure de bande, [221](#)

Structure fine, [197](#)

Structure hyperfine, [197](#)

Surface d'onde
définition, [135](#)

Symétrie du potentiel et quantités conservées
pour un point, [35](#)
pour un système de points, [36](#)

Système solaire
centre de masse, [29](#)

Température, [91](#)
échelle, [62](#)

Températures négatives, [213](#)

Test de Lucas, [285](#)

Théorème d'équipartition, [213](#)

Théorème d'Earnshaw, [209](#)

Théorème de Bertrand, [55](#)

Thermoélectrique, [92](#)

Thermostat, [71](#)

Thomson, [92](#)

Trains d'onde, [156](#)

Transformateur, [128](#)

Transformation de Lorentz
causalité, [41](#)
démonstration, [41](#)

Transition de phase, [94](#)
classification, [80](#)

Transition ferro-para, [79](#)

Transition para-ferro, [94](#)

Travail des forces de pression, [65](#)

Triphasé, [127](#)

Tube de Kundt, [149](#)

Tube fluorescent, [169](#)

Tuyau ouvert CL, [138](#)

Ultrason, [252](#)

Unités, [71](#)

Van der Pol, [257](#)

Van-Cittert Zernike, [156](#)

Viscosité, [44](#)

Vitesse de groupe supraluminique, [141](#)

Vitesses du son, [225](#)

Vitre
isolation sonore, [138](#)

Voltmètre
erreur, [248](#)

Wiener-Kinchin, [156](#)