

# **Leçons de physique**

Ludivine Emeric

7 juin 2021

# Table des matières

1	SYMÉTRIES	6
2	ADAPTATION D'IMPÉDANCE	9
3	CONVERSIONS D'ÉNERGIE	11
4	SYSTÈMES COUPLÉS	14
5	RÉGIMES TRANSITOIRES	15
6	PRINCIPES VARIATIONNELS. APPLICATIONS.	16
7	GRAVITATION	17
8	LOIS DE CONSERVATION EN DYNAMIQUE	19
9	CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES. FROTTEMENT	20
10	DYNAMIQUE EN RÉFÉRENTIEL NON GALILÉEN	21
11	PRÉCESSION ET APPROXIMATION GYROSCOPIQUE	22
12	CINÉMATIQUE RELATIVISTE	23
13	DYNAMIQUE RELATIVISTE	24
14	COLLISIONS ET LOIS DE CONSERVATION EN MÉCANIQUE CLASSIQUE ET RELATIVISTE	25
15	MANIFESTATIONS DU CARACTÈRE NON GALILÉEN D'UN RÉFÉRENTIEL	27
16	MOUVEMENTS DANS UN CHAMP DE FORCE CENTRALE	29
17	MOUVEMENTS CLASSIQUE ET RELATIVISTE D'UNE PARTICULE CHARGÉE	30
18	NOTION DE VISCOSITÉ D'UN FLUIDE. ÉCOULEMENTS VISQUEUX	31
19	MODÈLE DE L'ÉCOULEMENT PARFAIT D'UN FLUIDE	32
20	PHÉNOMÈNES INTERFACIAUX IMPLIQUANT DES FLUIDES	33
21	RÉGIMES D'ÉCOULEMENTS EN MÉCANIQUE DES FLUIDES	34
22	BILANS MACROSCOPIQUES EN MÉCANIQUE DES FLUIDES	35

## *Table des matières*

23	PHYSIQUE DU VOL : PORTANCE ET TRAÎNÉE	36
24	PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE	39
25	TRANSITIONS DE PHASE	40
26	PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT	42
27	GAZ RÉELS, GAZ PARFAIT	43
28	ÉVOLUTION ET CONDITION D'ÉQUILIBRE D'UN SYSTÈME THERMODYNAMIQUE FERMÉ.	44
29	MACHINES THERMIQUES	45
30	FACTEUR DE BOLTZMANN	46
31	RAYONNEMENT D'ÉQUILIBRE THERMIQUE. CORPS NOIR	47
32	ENTROPIE EN PHYSIQUE STATISTIQUE ET THERMODYNAMIQUE	48
33	PHÉNOMÈNES DE DIFFUSION	49
34	PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE EN ÉCOULEMENT. APPLICATIONS	52
35	BILANS THERMIQUES. ILLUSTRATIONS	53
36	PHÉNOMÈNES IRRÉVERSIBLES EN THERMODYNAMIQUE	54
37	ÉTUDE THERMODYNAMIQUE DU CORPS PUR DIPHASÉ	55
38	CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE.	56
39	INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE	57
40	PROPRIÉTÉS MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNÉTIQUES	58
41	MÉCANISMES DE LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES SOLIDES	59
42	PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE DANS DIFFÉRENTS DOMAINES DE LA PHYSIQUE	60
43	OSCILLATEURS ; PORTRAITS DE PHASE ET NON-LINÉARITÉS	61
44	RAYONNEMENT DIPOLAIRE ÉLECTRIQUE	62
45	LE CHAMP MAGNÉTIQUE	63
46	CHAMP ÉLECTRIQUE	65
47	CONDUCTION ÉLECTRIQUE EN PRÉSENCE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES	66
48	RÉTROACTION ET OSCILLATIONS	67
49	TRAITEMENT D'UN SIGNAL. ÉTUDE SPECTRALE	68

## *Table des matières*

50 ONDES PROGRESSIVES, ONDES STATIONNAIRES	69
51 ONDES ACOUSTIQUES	70
52 PROPAGATION GUIDÉE DES ONDES	71
53 DISPERSION ET ABSORPTION	72
54 MILIEUX DIÉLECTRIQUES	73
55 PHÉNOMÈNES ONDULATOIRES À UNE INTERFACE EN ÉLECTROMAGNÉTISME	74
56 ÉQUATIONS D'ONDE	75
57 ONDES ÉVANESCENTES	78
58 OSCILLATEUR HARMONIQUE : APPROXIMATION ET LIMITATIONS	80
59 FILTRAGE LINÉAIRE	83
60 EFFET DOPPLER ET APPLICATIONS	84
61 MODULATION, DÉMODULATION	87
62 RÉGULATION ET ASSERVISSEMENT	88
63 INDUCTANCE : DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME À L'ÉLECTRODYNAMIQUE	91
64 MICROSCOPIES OPTIQUES	92
65 INTERFÉRENCES À DEUX ONDES EN OPTIQUE	94
66 INTERFÉROMÉTRIE À DIVISION D'AMPLITUDE	95
67 DIFFRACTION DE FRAUNHOFER	96
68 DIFFRACTION PAR DES STRUCTURES PÉRIODIQUES	97
69 ABSORPTION ET ÉMISSION DE LA LUMIÈRE	98
70 LASER	99
71 INSTRUMENTS D'OPTIQUE (HORS MICROSCOPES)	101
72 SPECTROSCOPIES	103
73 LOIS DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE	104
74 PRODUCTION ET ANALYSE DE LA LUMIÈRE POLARISÉE	105
78 OPTIQUE DE FOURIER	111
76 PHOTOGRAPHIE	109

## *Table des matières*

77 MESURES INTERFÉROMÉTRIQUES	110
78 OPTIQUE DE FOURIER	111
79 SYSTÈMES QUANTIQUES À DEUX NIVEAUX	112
80 ASPECTS ONDULATOIRES DE LA MATIÈRE	113
81 CONFINEMENT D'UNE PARTICULE ET QUANTIFICATION DE L'ÉNERGIE	114
82 EFFET TUNNEL	115
83 MODÈLES DE L'ATOME	116
84 EXPÉRIENCE DE STERN-GERLACH ET CONSÉQUENCES	117
85 EQUATION DE SCHRÖDINGER ET APPLICATIONS	120
86 STRUCTURE ET STABILITÉ DES NOYAUX ATOMIQUES	123
87 CAPACITÉS THERMIQUES : DESCRIPTION, INTERPRÉTATIONS MICROSCOPIQUES	124
88 APPROCHE MICROSCOPIQUE DU PARAMAGNÉTISME ET DU FERROMAGNÉTISME	125
89 APPLICATION DES SEMICONDUCTEURS À L'ÉLECTRONIQUE ET/OU L'OPTIQUE	126
90 FERMIONS, BOSONS, ILLUSTRATIONS	129

Niveau Licence

Prérequis

- électrostatique
- mécanique lagrangienne
- quadri-forces
- théorie de la bifurcation (pour diagrammes d'Elastica)

**Message** Ici y a trop de choses, effet catalogue, ça part trop loin.

**Bibliographie**

## Introduction

de tout temps physiciens se sont intéressés à symétrie  
Euclide...

## 1 Principe de symétrie

### 1.1 Qu'est-ce qu'on entend par symétrie

symétrie planaire

Chimie : molécules chirales, prendre les formes à assembler

d'autres types de symétrie : symétries continues, associées à notions d'invariance

invariance par translation dans l'espace : ex lacher balle de ping-pong donne même résultat à un endroit ou à un autre

invariance par translation dans le temps : même expérience dans le temps

invariance par rotation

### 1.2 Principe de Curie

(Pierre Curie)

les effets d'un phénomène possèdent au moins les symétries de sa cause

électrostatique : cause distribution de charges  $\rho$ , effet : champ électrique  $\vec{E}$

symétries de  $\rho$  d'une sphère chargée : ne dep pas du temps, inv par rotation  $\rightarrow$  même chose pour  $\vec{E}$

résolution avec Gauss...

Remarque principe de Curie en chimie : mélange racémique, pour produire un seul énantiomère il faut briser la symétrie, introduire autre chose; importance par exemple avec thalidomine tératogène vs anti-nauséeux, corps humain est lui même chiral

### 1.3 Brisure de symétrie

Elastica : flambage, position d'équilibre penchée (bifurcation)  
Généralisation : il faut prendre en compte l'ensemble des effets possibles  
diagramme de bifurcation : diagramme  $x_{eq}$  en fonction de  $m$   
limitations ici : l'elastica est un peu déformé, tend vers un côté préférentiellement

## 2 Symétries et lois de conservation

### 2.1 Conservation de l'impulsion

$F = -\frac{dV}{dx}$  F dérive du potentiel V  
particule de masse  $m$  dans un référentiel galiléen  
PFD  
hypothèse : le système est invariant par translation dans l'espace  
 $\frac{d}{dx} \rightarrow 0$   
 $F=0$   
 $\frac{d(m\dot{x})}{dt} = 0$   
l'impulsion se conserve

### 2.2 Théorème de Noether

lagrangien  $L(x, \dot{x}, t)$  avec  $x(t)$  et  $\dot{x}(t)$   
hypothèse : le système est invariant par variation continue d'une grandeur  $S$  :  $\frac{dL}{dS} = 0$

### 2.3 Conservation de l'énergie

invariance par translation dans le temps :  $s = t$   
Hamiltonien...  
calcul montre que  $E_m$  se conserve

## 3 Autres invariances

### 3.1 Invariance par rapport au choix de coordonnées

la nature se fiche de notre choix de coordonnées  
mécanique classique : force est un vecteur,  $m\vec{a}$   
relativité restreinte : quadri-vecteurs

### 3.2 Invariance du choix des unités

théorème II  
analyse dimensionnelle

dilatation des systèmes

## Conclusion

on peut en déduire bcp d'informations sur les propriétés que doit avoir un système  
contraintes sur modèles théoriques  
théorie quantique des champs

### Remarques

- invariances et symétries : invariance est conséquence de symétrie
- Curie a découvert le principe par cristallographie : cristaux ont propriétés de symétrie discrète; effets : interaction avec champ électromagnétique, diffraction aux rayons X; voir BUP 689
- inversion du temps : important dans beaucoup de domaines, réversibilité
- invariance par rotation vs symétrie par rotation
- la chimie ne se résume pas aux effets chiraux, autres phénomènes en chimie qui jouent sur les réactions : effets stériques, orbitaux
- manipulation sur coin de table : important pour montrer que c'est concret, analogies; genre pendule dépend du temps mais invariant dans le temps
- thermodynamique : transition de phase ferromagnétisme paramagnétisme → brisure de symétrie, bifurcations fourche
- lien avec entropie : augmente lors de la brisure
- $x$  : coordonnées généralisée, par forcément une longueur
- $s$  : paramètre qui décrit la symétrie, nom?
- Hamiltonien est énergie du système toujours? quand dimension d'une énergie oui
- contexte historique Einstein : équation de Maxwell étaient invariant de Lorentz, pas Galilée, en relativité l'invariant est l'intervalle
- théorème  $\Pi$  : si j'ai une fonction de variables dimensionnées, je peux le réécrire come une relation adimensionnée
- symétrie de jauge
- invariant de l'électromagnétisme et Noether : conservation de la charge
- Elastica : imperfect pitchfork
- faire calcul d'entropie?
- principe de relativité affirme que les lois physiques s'expriment de manière identique dans tous les référentiels inertiels : les lois sont  $\hat{n}$  invariantes par changement de référentiel inertiel  $\hat{z}$



# Adaptation d'impédance

Niveau CPGE

Prérequis

- équation de d'Alembert
- modélisation du câble coaxial
- AO

Message Partout, c'est la vie.

Bibliographie

- [1] Crawford FRANK. *Berkeley : cours de physique. 3. Ondes.*
- [2] Etienne THIBIERGE. *Ondes.*

## Introduction

Permettre un transfert de puissance optimal

Couche anti-reflet, cornets, cuivre (instrument), picots en salle insonorisée ou au plafond de salles...

réf. [1], [2]

Voir Berkeley, Landau et Feynman

## 1 Câble coaxial : réflexion sur une impédance terminale

### 1.1 Rappel

équations des télégraphes sans pertes

### 1.2 Réflexion sur une résistance terminale

Résistance placée à la suite du câble

Détermination des coefficients de réflexion en amplitude

$R = Z_C$  : réflexion nulle, c'est ce qu'on appelle adaptation d'impédance  
intérêt du montage suiveur

## 2 Application pratique en acoustique : l'échographie

### 2.1 Interface air-muscle

intensité réfléchie, intensité transmise

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

$$T = 4 \frac{Z_2 Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$$Z_{\text{air}} = 444 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ et } Z_{\text{muscle}} = 1,7 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$T = 10^{-3} \text{ très faible}$$

### 2.2 Gel entre les deux

a priori, impédance du gel est entre les 2

Attention, le calcul est bizarre : ne pas se fier au td d'hydro

en supposant qu'il n'y a pas de réflexion : condition d'adaptation d'impédance  $\rightarrow \frac{Z_g - Z_a}{Z_g + Z_a} = \frac{Z_g - Z_m}{Z_g - Z_m} e^{-2ik_g e}$   
les impédances ne sont pas complexes car équation vraie que pour certains e

conditions aux limites  $\rightarrow 2k_g e = 2n\pi$  ou  $(2n + 1)\pi$ , paire ou impaire  $\rightarrow$  solution intéressante :  
impaire

$$Z_g = \sqrt{Z_a Z_m}$$

$$Z_g = 2.7.10^4 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

### Conclusion

maximiser intensité transmise

#### Remarques

- exo de l'échographie est schématique : en vrai ce n'est pas de l'air, c'est l'émetteur
- pourquoi il n'y a pas de réflexion dans l'air?
- Fabry-Pérot, couche anti-reflet
- suiveur : désadapte l'impédance
- électronique : on parle d'adaptation d'impédance pour maximiser le rendement
- quand on cherche à annuler la réflexion, on maximise la puissance transmise
- impédance d'un dipôle : extensif
- impédance d'un milieu : intensif
- on les traite différemment : ça dépend de la dimension à laquelle on les regarde
- impédance caractéristique
- cornet : (ex ondes centimétriques) fait varier continûment l'impédance
- impédance : lien entre une force cinétique et une force de rappel; oscillation de l'énergie par passage de forme cinétique à potentielle
- coefficients de Fresnel
- $Z = \frac{\text{"force"}}{\text{"déplacement"}}$
- conditions aux limites : dépend du rapport entre les impédances, on peut donc tout ramener aux impédances, ça rebondit
- cas des dipôles : traité comme ponctuel
- trompette, réflexion du son sur un mur; boîte d'oeuf : tout est absorbé
- déferlement de vagues?
-

# Conversions d'énergie

Niveau CPGE

## Prérequis

- premier et deuxième principes de la thermodynamique
- lois de Faraday et de Lenz
- action d'un champ magnétique sur un moment magnétique

**Message** Il n'y a pas de source d'énergie brute dans la nature (genre l'hélium c'est génial youhou, en fait non), il n'y a que des conversions et transports, et puis des pertes... beaucoup de pertes... partout des pertes!

## Bibliographie

[1] Jeremy NEVEU. *Moteurs et transformateurs électriques*.

## Introduction

L'énergie est une grandeur définie comme "se conservant"  
différentes formes, on en veut sous différentes formes, comment passer d'un à l'autre?  
Comment peut-on l'utiliser?  
Sa consommation permet de faire fonctionner tous les outils de la vie  
électrique, thermique, mécanique, chimique...  
on va s'intéresser à la chaîne majoritaire de production d'électricité en France : combustion →  
énergie thermique → ??? → énergie mécanique → ??? → énergie électrique  
on va voir ce que sont ces???

réf. [1]

## 1 Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique

### 1.1 Rappels de thermodynamique

1er principe, variation d'énergie interne : travail et transfert thermique  
moteur thermique permet de passer d'une forme à l'autre  
2e principe, variation d'entropie : entropie échangée et entropie créée

### 1.2 Moteurs thermiques

système qui transforme  $Q$  en  $W$   
exemple du moteur de Stirling  
source chaude, source froide  
Transformations cycliques :  $\Delta S = 0$ ,  $\Delta U = 0$

### 1.3 Rendement

$$Q_f < 0$$
$$\eta = \frac{-W}{Q_c}$$

### 1.4 Machines thermiques réelles

Pas réversibles : il peut y avoir des frottements et échauffement de la source froide

Moteur à explosion

Moteur diesel : animation avec admission, compression, combustion, échappement

[Vidéo Youtube moteur](#)

[ou cette vidéo](#)

[ou celle-ci](#)

transition : chaîne énergétique, on a vu comment faire thermique vers mécanique, on a de l'énergie mécanique là, on veut de l'énergie électrique

## 2 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

### 2.1 Principe d'un alternateur

expérience avec une bobine Leybold, une barre de fer doux, un aimant tourne au milieu

quand ça tourne, on a création d'un champ électrique

flux du champ magnétique, fem

loi de Lenz : champ  $\vec{B}'(t)$  créé s'oppose à la rotation des aimants

un couple résistif apparaît :  $\vec{\Gamma} = \text{vec}M \wedge \text{vec}B'$

### 2.2 Moteur synchrone

$$\vec{\Gamma} = MB \sin \theta \vec{u}_z$$

B : champ tournant à  $\Omega$

M : rotor à  $\omega$

initialement  $\theta(0) = \alpha$

$$\theta(t) = (\Omega - \omega)t + \alpha$$

$$\vec{\Gamma}(t) = MB \sin((\Omega - \omega)t + \alpha)$$

moyenne nulle si les fréquences sont différentes

si  $\Omega = \omega$ , non nul... courbe caractéristique de  $\Gamma = f(\alpha)$

cas alternateur

cas moteur : on regarde la branche moteur ( $\Gamma > 0$ ), on identifie laquelle est pente est stable ou instable

pente positive : stable, pente négative : instable car si  $\Gamma_r$  augmente, alors  $\omega$  diminue, donc  $\alpha$  augmente

## Conclusion

Chaîne énergétique totale

TD : sources de pertes au sein d'un alternateur

énergie géothermique, solaire

#### Remarques

- fonction d'état : définie à l'équilibre, dépend des variables d'état
- on peut parler de variables d'état primitives ( $V, N, U$ ) (une fonction d'état ne dépend pas que de ça) mais pas en CPGE
- définition énergie interne : ensemble des énergies cinétiques et potentielles microscopiques, définies par statistique
- échange de matière entre systèmes, que devient l'entropie?
- source chaude : modèle du thermostat
- réversibilité n'est pas souhaitable car puissance tend vers 0
- moteur diesel : pourquoi plusieurs cylindres? permet d'améliorer régularité, éviter les coups
- on peut faire rentrer le combustible dans la phase d'admission
- alternateur
- vraie centrale : on chauffe de l'eau, s'évapore, pression sur turbines, met en rotation l'arbre de l'alternateur (rotor)
- préciser Stirling : 2 monothermes + 2 adiabatiques
- autre plan possible : fusion dans soleil, effet photovoltaïque

# Systèmes couplés

Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

1

1.1

1.2

2

2.1

2.2

3

3.1

3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—

Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—

# Principes variationnels. Applications.

Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

1

1.1

1.2

2

2.1

2.2

3

3.1

3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—



Niveau CPGE

Prérequis

- Mécanique de point
- Théorèmes généraux mécanique
- Électrostatique

**Message** Attention demo trajectoires coniques n'est plus au programme de CPGE depuis 2014, nécessité de placer en L3 ou admettre le résultat sans trop analyser mathématiquement, mais les trajectoires sont à connaître sans les formules géométriques.

**Bibliographie**

## Introduction

modèle géocentrique, planètes ont été identifiées : se déplacent dans le ciel nocturne

modèle héliocentrique : Copernic

[animation NASA](#) ou [animation astronomie](#)

## 1 Interaction gravitationnelle

### 1.1 Force gravitationnelle

mentionner troisième loi de Newton : actions réciproques

### 1.2 Champ de pesanteur

### 1.3 Énergie potentielle gravitationnelle

## 2 Mouvement dans un potentiel gravitationnel

### 2.1 Position du problème

### 2.2 Potentiel effectif

démo coniques seulement si choix L3

### 2.3 Lois de Kepler

## 3 Application : vitesse de libération

## Conclusion

### Remarques

- unité de  $G$ ? mesure de  $G$ ? pendule de torsion, horloge atomique
- masses ponctuelles?
- traditionnellement ce que l'on appelle pesanteur sur Terre : on inclut force (centrifuge)

## 7 Gravitation

d'inertie d'entrainement (référentiel terrestre non galiléen, Terre tourne sur elle-même) et force de marée

- analogue pour champ magnétique  $B$  dans gravitation? non
- modèle de la Terre creuse : roman de Jules Verne... alors par de gravitation à l'intérieur (Gauss, masse nulle entourée donc force nulle)
- $\text{rot}G$ ? nul
- pas de masse négative : force gravitationnelle d'un anti-atome d'hydrogène, interagissent de la même manière par interaction gravitationnelle? en cours de recherche
- on peut négliger variations gravitation à la surface de la Terre, mesure? gravimétrie, applications économiques : recherche pétrole, mesure différence de densité
- mesure de la chute libre par Galilée : tour de Pise, pas de chronomètre, mesure du temps à l'aide de son pouls
- détecter une planète : voir changement de trajectoires, clignotement quand passent devant leur étoile, lunette gravitationnelle, méthode des transits

# Lois de conservation en dynamique

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Contact entre deux solides. Frottement

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Précession et approximation gyroscopique

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.

**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

### Remarques

- toupie
- frisbee, boomerang : trainée et portance permettent le vol, effet gyroscopique le stabilise

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# 13 Dynamique relativiste

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.



# Collisions et lois de conservation en mécanique classique et relativiste

Niveau L3

Prérequis

- mécanique du point
- changement de référentiel
- relativité, quadrivecteurs, loi de la dynamique

**Message** Socle de l'étude de la dynamique des réactions nucléaires et des collisions de particules (désintégration, collision, etc.).

Bibliographie

## Introduction

il y a partout des collisions  
 on reste sur le cas élastique (conservation énergie cinétique, pas transfert énergie interne, cf boules de billard) inélastique=déformation en général (cf 2 voitures)  
 montrer pendule de Newton  
 plein d'images  
[Vidéo Youtube du choc de 2 billes](#)  
 faire que des points matériels ou sphères dures  
 A quoi servent les collisions? sonder la matière

## 1 Conservation de l'énergie

exp de rutherford : particule alpha sur cible particule Au, totalement classique (une particule ponctuelle, l'autre non et on détermine rayon de l'atome d'Au)  
 on sonde la matière qu'on fait collisionner

## 2 Conservation du quadrivecteur énergie-impulsion

diffusion compton : photon sur électron, diffusion

Seulement si le temps :

## 3 Collision inélastique : boson de Higgs

découverte du boson de Higgs  
 2 gluons fusionnent, se désintègre en 2 photon (symétriques),  $2 \hbar c / \lambda$ , à partir du pic d'énergie en fct de masse  
 trouver figure sur google

## Conclusion

### Remarques

- en pratique, pour analyser une réaction, on fait un usage intense du fait que, d'une part, le quadrivecteur énergie-impulsion est conservé, et que, d'autre part, les pseudo-produits scalaires de quadrivecteurs sont invariants par changement de référentiels
- référentiel du centre de masse : impulsion totale est nulle (mais pas l'énergie)
- la masse invariante  $M$  est un invariant de Lorentz : pour un système donné, sa valeur est indépendante du référentiel.
- certaines collisions inélastiques en classique sont élastiques en relativiste
- symétrie  $\Rightarrow$  conservation d'une quantité
- ne pas faire trop de calculs
- ne pas dissocier classique et relativiste, traiter ensemble

# Manifestations du caractère non galiléen d'un référentiel

Niveau Licence

## Prérequis

- mécanique du point (cinématique)
- force d'attraction newtonienne
- changement de référentiel, point coïncident (=point fictif que l'on balade entre les référentiels)
- principe d'inertie

**Message** Attention le référentiel terrestre n'est plus vraiment étudié en CPGE et changement de référentiel est en spé. Ne pas faire trop de théorie, juste rappel sur slide.

## Bibliographie

## Introduction

### 1 Description des référentiels usuels

#### 1.1 Principe d'inertie

#### 1.2 Changement de référentiel et forces d'inertie

Rappels

#### 1.3 Une définition relative

### 2 Application au référentiel terrestre

#### 2.1 Force d'inertie d'entraînement

#### 2.2 Force d'inertie de Coriolis

## Conclusion

### Remarques

- trop de rappels, balancer plutôt les lois de composition et faire un schéma pour le point H dans  $-\Omega^2 \vec{HM}$
- autres exemples manifestations terrestre non galiléen : face de la lune est toujours la même, dérive des icebergs, Pluton et un de ses satellites sont toujours la même face l'une de l'autre, galaxies ont forme de spirale, Terre est élargie aux équateurs (implique  $\Delta g = 0,06$ ), déviation vers l'est, marées, cyclones
- autres non galiléens : principe de l'essoreuse à salade, nucléaire pour séparer Rd... de Rd...?
- référentiel inertiel = référentiel galiléen
- principe d'équivalence d'Einstein : masse inertielle et masse gravitationnelle sont les mêmes

### *15 Manifestations du caractère non galiléen d'un référentiel*

- principe de relativité affirme que les lois physiques s'expriment de manière identique dans tous les référentiels inertiels : les lois sont  $\dot{n}$  invariantes par changement de référentiel inertiel  $\dot{z}$
- intéressant de parler des lavabos car idée reçue, vs cyclones, comparer dimensions...
-

Leçon

16

# Mouvements dans un champ de force centrale

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Leçon

17

# Mouvements classique et relativiste d'une particule chargée

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

# Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.



# Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Leçon

21

# Régimes d'écoulements en mécanique des fluides

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Leçon

**22**

# Bilans macroscopiques en mécanique des fluides

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- on aurait pu traiter la fusée
- fun fact pompiers : pour tenir le tuyau, un pompier se met dos à celui qui le tient pour l'aider à contrer la force
- ne pas faire de thermodynamique
- 
- 
-

Niveau CPGE

Prérequis

— mécanique des fluides

Message .

Bibliographie

## Introduction

On a vu montgolfière en statique des fluides  
 avion : vol, traînée et portance, comment ça marche  
 diapo : photo d'un avion Mirage  
 (toute la leçon est en régime écoulement stationnaire)

## 1 Force de traînée

### 1.1 Origines de la traînée

Trainée est colinéaire et dans le sens de l'écoulement

### Traînée de frottement

nombre de Reynolds  $Re \approx \frac{LU}{\nu}$   
 écoulement libre loin d'une aile d'avion  
 écoulement visqueux proche (couche limite) caractérisé par épaisseur  $\delta \approx \sqrt{\nu\tau} \approx \frac{L}{\sqrt{Re}}$   
 temps caractéristique  $\tau = \frac{L}{U}$

### Traînée de pression (ou traînée de forme)

rappeler Bernoulli  
 définition du coefficient de traînée  $\vec{F}_{tr} = -\frac{1}{2}\rho S U^2 C_x(Re) \frac{\vec{U}}{U}$   
 diapo écoulement en fonction du nombre de Reynolds : profils d'écoulements autour d'un cylindre circulaire pour différents  $Re$ ,  $C_x$  en fonction de  $Re$   
 forces de pression sont plus grandes là où attaque l'écoulement sur le cylindrique, plus faible en arrière : la résultante est vers l'arrière

ce sont les origines de la traînée

## 1.2 Formule de Stokes

$Re \ll 10$  où  $C_x \approx \frac{24}{Re}$

Force de traînée : expression

cas d'une sphère :  $Re = \frac{\mu R U}{\eta}$

Force de traînée, formule de Stokes :  $\vec{F}_{tr} = -6\pi\eta R \vec{v}_{solide/fluide}$  ( $\frac{24}{4} = 6$ )

Rq : pour  $Re$  intermédiaire  $10^3 - 10^5$ ,  $C_x$  est pratiquement constant, la fonction de traînée est quadratique en  $U$

diapo : ordre de grandeur coefficients de traînée de différents objets 3D (coeff frontaux)

## 1.3 Chute brutale du $C_x$

Au dessus d'un certain nombre de Reynolds (critique  $Re_c$ ), on a une chute du coefficient de traînée, c'est ce que l'on cherche en sport, fendre l'écoulement

En dessous de cette valeur, la traînée est trop grande, la balle lancée va moins loin

en augmentant la rugosité de la balle, on fait chuter le  $Re_c$

exemple : balle de golf, rainures balle de baseball

## 2 Force de portance

### 2.1 Portance d'une aile d'avion

il existe plusieurs formes d'ailes d'avion, symétrique, asymétrique

schéma : bord d'attaque, bord de fuite, corde, angle d'inclinaison

portance est verticale dues aux différences de vitesses d'écoulement et donc différence de pression

force totale : oblique car frottements

diapo : coeff de traînée et de portance en fonction de l'angle d'inclinaison (portance, traînée et polaire d'un profil NACA 4412)

angle de décrochage

définition coefficient de portance :  $\vec{F}_{pr} = \frac{1}{2} \mu S C_z U^2 \vec{n}$

### 2.2 Décrochage

diapo : écoulement très peu décollé vs décrochage

[vidéo youtube](#) illustrant décrochage

expérience avec soufflerie et balance, on change l'inclinaison de l'aile : la balance va afficher un poids négatif si portance, maximale en valeur absolue si portance maximale, diminue si décrochage; angle mesuré :  $30^\circ$ , dépend de la forme de l'aile

### 2.3 Finesse aérodynamique

$$Finesse = \frac{C_z}{C_x}$$

$Finesse = \tan \alpha = \frac{AG}{AB}$  (c'est l'angle que fait la force totale avec la verticale)

## Conclusion

on peut parler de traînée induite lorsque l'aile n'est pas infiniment longue  
 la surpression en dessous rejoint la dépression au dessus  
 on utilise des winglets pour initier les tourbillons (traînée de condensation)  
 hélicoptères : faible vitesse, portance pas due aux mêmes phénomènes  
 la portance se retrouve vers le haut car pales incurvées, création d'une surpression en bas, dépression en haut il y a aussi une traînée, cherche à diminuer  
 vol stationnaire : pas de traînée de la carcasse de l'hélico, seulement les pales

### Remarques

- les pâles d'une éolienne sont vrillées
- les pâles d'un hélicoptère : change d'incidence en court de course pour s'adapter, palonnier; pale s'incurve vers le haut par force centrifuge
- couche limite : conditions aux limites de non-glissement (donc accrochage)
- couche limite décolle au-delà d'un certain nb de Reynolds, l'écoulement va devenir turbulent, ce modèle n'est alors plus valable
- pourquoi  $C_z$  est adimensionnée avec  $\frac{1}{2}\rho S U^2$ , pression, Bernoulli, surpression  $\frac{1}{2}\rho U^2$ , le coefficient  $C_z$  traduit l'écart à pression Bernoulli; Gustave Eiffel a fait des mesures de temps de chute, a travaillé sur des souffleries pour mesurer les coefficients de traînée (fun fact : il ne croyait pas au nombre de Reynolds ni au changement de référentiel, c'était un ingénieur)
- compressibilité du gaz est importante? faut-il que l'air soit compressible pour voler? empêche pas écoulement incompressible, sous l'eau ça marche, même proche la vitesse du son c'est négligeable; ce qui compte c'est la différence de pression
- $C_x$  coefficient de traînée est similaire entre sphère et cylindrique, seules les asymptotes changent, un peu plus hautes
- on peut pas créer la portance à bas Reynolds
- il faut mentionner Bernoulli dans cette leçon
- structure de l'aile : bord de fuite pointu pas nécessaire (avantage : provoquer turbulences, intéressant pour traînée faible), bord d'attaque n'est pas nécessairement rond
- mécanisme pression plus élevée en bas d'une aile qu'en haut : écartement des lignes de courant en dessous, rapprochement au dessus; flux de quantité de mouvement vers la base
- surface considérée en portance : surface projetée (physique) ou surface totale à plat (utilisée par professionnels de l'aviation)
- intérêt, limites de l'expérience : tube de Pitot peut montrer vitesse uniforme en sortie de soufflerie, jusqu'à un certain point, aile d'avion est de même taille que soufflerie donc pas homogène, et angle d'inclinaison fait que pas uniformément; en pratique dans les souffleries : le diamètre doit être 10x supérieurs à la section de l'objet que l'on teste
- ordre de finesse : parapente 10, oiseau 10, ie 1m en horizontal descend de 10m
- les avions ne battent pas des ailes car trop d'effort, on ne comprend pas tout des écoulements, interactions compliquées, petits drones oui

# Premier principe de la thermodynamique

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau L3

Prérequis

- potentiels thermodynamiques
- électromagnétisme dans les milieux

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

définition phase

## 1 Transition liquide-vapeur d'un corps pur

### 1.1 Approche phénoménologique

Description (P,T), (P,V)  
Point critique, triple

#### Écran

Diagrammes thermodynamiques de l'eau

### 1.2 Étude thermodynamique

### 1.3 Discontinuité et relation de Clapeyron

### 1.4 Mise en uvre expérimentale

## 2 Transition paramagnétique-ferromagnétique

### 2.1 Modélisation

### 2.2 Minimisation du potentiel

#### Expérience

Chauffer diazote liquide, peser et déterminer la masse perdue par vaporisation; faire sans chauffer, puis en chauffant

## Conclusion

$H=f(M)$  pour différent T, quand T diminue en-dessous de température de Curie : bifurcation fourche



## Remarques

- point critique : opalescence
- eau : liquide-vapeur pente (P,T) négative
- Landau : discussion de symétries, brisure de symétrie transition para-ferro, on privilégie un certain axe; la phase la plus ordonnée est ferro (ordre magnétique)
- liquide-vapeur : pas de brisure de symétrie car au-delà du point critique, passe continûment de l'un à l'autre
- autres transitions de phase : métal supraconductrice vers conducteur (transition du premier ordre?), condensat de Bose-Einstein superfluide, variétés allotropiques, cristaux liquides
- état métastable : la création de surface entre deux phases a un coût, le changement d'état est retardé, un système dans un tel état peut être amené vers l'état stable à partir d'une petite perturbation (exemple : eau congélateur, sortir au bon moment, une pichenette et ça gèle instantanément)
- autre exemple métastable : chevaux hiver 1942 Leningrad, lac Ladoga, congelés dans l'eau
- liquide-vapeur métastable : nucléation dans casserole quand on fait chauffer l'eau : les bulles viennent d'endroits particuliers, nécessite défauts. Pression diminue tant qu'aucune bulle de vapeur n'apparaît pas. Pression peut être négative dans le liquide si pas de défaut paroi : la cohésion des molécules entre elles et avec les parois permet d'exercer cette pression négative (terme  $a/V^2$  dans van der Waals pour fluide) ([lien pour sources](#)). Les pressions négatives observées dans de l'eau peuvent atteindre plusieurs centaines de fois la pression atmosphérique! Cavitation : défaut provoque la nucléation d'une bulle
- solide-liquide métastable : brouillard givrant (eau en surfusion)
- le diamant est métastable
- chambre à bulles : hydrogène liquide maintenu dans un état surchauffé, champ magnétique, trajectoire particule courbée, matérialisée par formation d'une trainée de bulles (Prix Nobel 1960)
- chambre à brouillard : inverse, trainée de condensation (Prix Nobel 1927, ancêtre?) pour l'étude de particules radioactives, étude de produits de réactions nucléaires, étude d'interactions... Charles Wilson l'a inventé en essayant de comprendre pourquoi les nuages se forment. Première méthode d'imagerie
- cristaux liquides : transition smectique-nématique... vaste sujet chimique
- le fer n'est pas un bon exemple de transition para-ferro car il y a aussi un changement de variété allotropique vers la température de Curie
- brisure spontanée de symétrie généralisée par chapeau mexicain : modèle de Higgs

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé.

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau L3

Prérequis

—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
- 2
- 3

## Conclusion

### Remarques

- introduit en 1865 par Rudolf Clausius, un terme qui fait référence à la fois à l'énergie et à la transformation
- l'entropie d'un corps noir est proportionnelle à son aire (et colossale), renseigne sur quantité d'information que renferme le trou noir; lorsqu'un objet tombe dedans, le trou noir absorbe son entropie, ce qui permet à l'univers de pas avoir une entropie qui diminue
- plasmas : convergent vers équilibre sans changement d'entropie, réversible grâce à interaction à distance (champ électrique); Landau prétendait que même sans collision, le plasma se rapprocherait de l'équilibre suite à une diminution du champ électrique (pour équation de Vlasov-Poisson linéarisé, Villani l'a démontré avec non-linéaire)

—  
—  
—  
—  
—  
—



Niveau CPGE

Prérequis

- premier principe de la thermodynamique
- bilans locaux (d'énergie, ttc...)

Message .

Bibliographie

- [1] Bernard DIU. *Thermodynamique*. Hermann, 2007.
- [2] Marie-Noelle SANZ. *Physique tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2016.
- [3] URBACH. *Approche physique du transport de la matière dans les milieux biologiques*.

## Introduction

terme du langage courant, qu'est-ce que ça veut dire en physique?

Vidéo diffusion : diffusion microscopique

application : isolation habitat, résistance thermique

réf. [2],[1]

## 1 Diffusion de particules

### 1.1

Bilan

Diffusivité en  $m^2.s^{-1}$

### 1.2 Loi de Fick

phénoménologique

irréversibilité

ex : diffusion parfum :  $D \approx 10^{-6} - 10^{-4}$ ,  $\tau = l^2/D = 115 \text{ jours}$  à une distance de 10m

sucré dans eau :  $D \approx 10^{-12} - 10^{-8}$ , café  $\tau = 10^{11} s$

phénomène très lent

### 1.3 Équation de diffusion

### 1.4 Analogie thermique

On a la même chose!! Tableau  
phénomènes lents à nos échelles

## 1.5 Diffusion thermique

(pression constante car s'équilibre avec l'environnement, système est difficile à définir, éviter de dire des bêtises, utiliser H (voir [1]) ou juste analogie)  
(conditions aux limites pas évidentes)

### Densité de courant thermique et équation de conservation

Flux thermique  
Établissement de l'équation de conservation 1D

### Loi de Fourier et équation de diffusion

même chose avec diffusivité thermique  
OdG conductivité thermique latéraux non métalliques  $\sim 1 \text{ W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , métaux  $\sim 100 \text{ W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$

### En régime permanent : détermination de la conductivité thermique

expérience avec cuivre  
résultat :  $460 \text{ W.s}^{-1}.\text{K}^{-1}$

## 2 Aspects microscopiques

Marche aléatoire (voir cours Alain Aspect)  
relation d'Einstein

## 3 Applications

voir Termniale STI2D  
résistance thermique  
résistance hydraulique

## Conclusion

Tableau récapitulatif des deux diffusions  
Généralisation  
Plus tard : en mécanique des fluides diffusion de la quantité de mouvement

### Remarques

- résistance thermique  $\Delta T = R_{th}\Phi$ , analogue à loi d'Ohm
- dépend de la surface ou du contour de la surface?
- définir problème 1D :  $j_Q$  ne dépend que d'une variable spatiale; plusieurs dimensions : surface peut changer, étudier le rapport?
- barre unidimensionnelle : il y a des pertes latérales, donc ne dépend pas d'une dimen-

sion spatiale

- intéressant : calcul marche aléatoire pour établir diffusion
- différence conductivité thermique métaux/non-métaux car conductivité électrique
- renversement du temps : solution n'est plus la même, donc pas réversible
- exemple de source de diffusion : réaction chimique, création d'une molécule ; réaction nucléaire (source de particules et de température) ; photon dans soleil
- exemple où Fick ne marche pas : supernova, bombe nucléaire
- 
- diffusion de matière, diffusion thermique, diffusion de quantité de mouvement, diffusion de charge
- relation d'Einstein : fluctuation-dissipation
- milieux poreux chez BCPST
- exemples en biophysique : livres PACES (on a des livres d'exos pour médecine [3]), diffusion dans gel, quantité de nutriments dans cellule (taille limite d'une cellule)
- 
- 
- HS : diffusion des ondes EM (élastique vs inélastique) : onde-particule (Thomson, Compton), onde-matière (Rayleigh, Mie, Raman)

Leçon

34

# Principes de la thermodynamique en écoulement. Applications

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—

Leçon

36

# Phénomènes irréversibles en thermodynamique

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Leçon

37

# Étude thermodynamique du corps pur diphase

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

# Conversion de puissance électromécanique.

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— induction

**Message** Applications centrale dans la vie de tous les jours, s'applique majoritairement en France à deux reprises dans la chaîne de production/d'acheminement de l'électricité. Moteurs seulement au programme PSI.

**Bibliographie**

## Introduction

Moteurs à courant continu

Application : [paramètres génératrice d'EPR Flamanville](#) ou peut-être [ce lien](#)

**Transition :** .

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

### Remarques

Remarque concernant le contenu



Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Rayonnement dipolaire électrique

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

- électrostatique (équations de Maxwell et champ électrostatique)
- théorèmes d'Ostrogradski et de Stokes
- coordonnées cylindriques
- définition de l'intensité

Message .

Bibliographie

## Introduction

Grandeur vectorielle  
applications au quotidien : aimants  
champ magnétique terrestre mesuré par boussoles

## 1 Propriétés du champ magnétique

### 1.1 Sources

1820 Oersted, physicien danois, expérience : aiguille métallique à proximité d'un circuit électrique  
une interprétation possible : source de champ magnétique = déplacement de charges, ie courant électrique  
ordres de grandeurs...

### 1.2 Flux du champ $\vec{B}$

flux à travers surface fermée est nul  
lignes de champ sont fermées

### 1.3 Circulation du champ $\vec{B}$

théorème d'Ampère

## 2 Expression du champ magnétique

### 2.1 Symétries

de la distribution de courant  
à partir de la force de Lorentz

### 2.2 Invariances

### 2.3 Application à un câble cylindrique

## 3 Induction électromagnétique

schéma mouvement d'un aimant dans une spire : production d'une tension  
Loi de Faraday  
Loi de Lenz  
Applications : microphone, surtout haut-parleur

## Conclusion

Champ magnétique terrestre : dipôle magnétique (sud au nord géographique, angle  $11.5^\circ$  par rapport à l'axe de rotation de la Terre)  
moteurs

### Remarques

- $\text{div } \vec{B} = 0$  car il n'y a pas de monopole magnétique ; si ça existait : th de Gauss, équivalent du champ électrostatique radial Coulomb
- créer un champ magnétique qui simule un champ magnétique : solénoïde semi-infini (très grande longueur, regardée à une distance intermédiaire) → champ radial
- différence entre force de Lorentz et force de Laplace : la force de Lorentz ne travaille pas mais la force de Laplace peut travailler car force appliquée par les charges au conducteur, perpendiculaire au courant mais le déplacement est arbitraire
- cas où il y a une influence des charges sur le champ magnétique : charges en mouvement ; il faut aussi considérer leur vitesse pour connaître influence
- cas d'une bobine carrée
- cas d'une bobine torique
- calcul champ spire sur l'axe
- solénoïde
- H historiquement a été introduit en premier
- il faut absolument parler de l'aimant
- penser aux analogies dipôle électrique/dipôle magnétique



Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

### Introduction

1

1.1

1.2

2

2.1

2.2

3

3.1

3.2

### Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—

Leçon

47

# Conduction électrique en présence de champs magnétiques

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Traitement d'un signal. Étude spectrale

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Ondes progressives, ondes stationnaires

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Propagation guidée des ondes

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.



Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Phénomènes ondulatoires à une interface en électromagnétisme

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

- électrocinétique : loi de Kirchoff
- électromagnétisme : eq de Maxwell, force de Lorentz
- équation de d'Alembert (établi dans le cas de la corde 1D par exemple)
- dérivée particulière

Message Ondes dans plein de domaines.

## Bibliographie

- [1] Etienne GUYON. *Hydrodynamique physique*.
- [2] Stéphane OLIVIER. *Physique des ondes : électromagnétisme et optique : (2e année PC, PC-PSI, PSI)*.
- [3] Marie-Noelle SANZ. *Physique tout-en-un MP-MP\**. Dunod, 2004.
- [4] Marie-Noelle SANZ. *Physique tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2016.

## Introduction

définition onde et équation d'onde

propagation sans transport moyen de matière dont les dépendances sont définies par une équation d'onde

équation d'onde : équation différentielle à dérivées partielles, établit une relation entre dépendance temporelle et dépendance spatiale

[3]

autres : [2], [1]

## 1 Milieu non dispersif

## 1.1 Câble coaxial

établissement de l'équation de d'Alembert

prendre le temps d'expliquer le modèle, dimensions infinitésimales

## 1.2 Solutions de l'équation

def surface d'onde, les différentes solutions : planes, sphériques, progressives

### 1.3 Équation de dispersion

vitesse de phase, vitesse de groupe

## 2 Milieu dispersif

définition atténuation, absorption

dispersif=vitesse de phase dépend de  $\omega$ , il n'y a pas forcément d'absorption  
retour sur le câble coax avec résistances (équation des télégraphistes)

### 2.1 Équation de Klein-Gordon

modèle du plasma dilué (néglige interactions entre particules du plasma) non relativiste  
gaz ionisé neutre, hypothèse vitesse ions négligeable car beaucoup plus lourd  
on regarde en fait la moyenne des électrons : PFD sur un électron moyen  
par exemple ionosphère

[3] p516  
[4] p1001

### 2.2 Relation de dispersion

vitesse de phase, vitesse de groupe

## Conclusion

aussi en quantique, équation de Schrödinger  
équations non linéaire  
solitons

### Remarques

- une équation d'onde n'est pas forcément linéaire
- onde évanescence : pas qu'en MQ, ne se propage pas, SPP le long de la pénétration, miroir à atome
- Kichoff : nécessite ARQS (propagation des ondes dans le milieu plus rapide que variation de courant et tension, dépend de la taille du système)
- attention Klein-Gordon c'est limite prépa
- onde de surface : sujet riche
- penser aux conditions aux limites pour le guidage : change modes de propagation
- plan alternatif : I/Onde longitudinale dans plasma (1) Modèle plasma, 2) établir eq d'onde, 3) eq de Klein-Gordon), II/Onde de surface (le guyon p258 (combiner Euler, évolution isentropique, conservation...), TF -> eq de dispersion avec tanh, beaucoup de régimes limites, plein de choses à dire, [vidéo Youtube forme des ondes de surface...](#)), ccl : ondes solitaires (phénomène non-linéaire)
- équation télégraphiste, corde avec rigidité (dérivée 4eme de la position apparaît), onde acoustique
- Schrödinger n'est pas irréversible! Vraie pour l'équation de la chaleur

- autre équation d'onde : équation thermique (onde de chaleur)
- phénomènes non-linéaires : chaîne d'oscillateurs, pendule pesant...

**Niveau** CPGE 2ème année

**Prérequis**

- électromagnétisme (tout le cours)
- mécanique quantique (équation de Schrödinger)
- optique géométrique

**Message** Vu dans plusieurs domaines, ici on fait le lien entre tout, transversal.

**Bibliographie**

- [1] Claire LI. *Étude des propriétés de champ proche et de champ lointain des nano-antennes infrarouges*. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02493813/document>.

## Introduction

qqch qui s'atténue très rapidement dans une zone spatiale  
 définition propre... (nécessiter de sonder pour observer l'existence d'une telle onde)  
 manip : laser He-Ne, dioptré hémisphérique (ENSP585) (propriété : l'incidence est toujours normale), réflexion interne totale à l'interface rectiligne : a priori il n'y a pas d'onde, mais si l'on prend un autre prisme hémisphérique que l'on place approximativement proche de l'autre, on a un rayon, donc il y a transmission  
 ça s'appelle réflexion interne frustrée

Vidéo IOGS Manuel Joffre

## 1 Ondes évanescentes électromagnétiques

### 1.1 Définition et mise en évidence expérimentale

### 1.2 Explication théorique : dépasser les lois de Snell-Descartes

expression angle réflexion totale interne théorique  
 Equation de Helmholtz (attention c'est bien dans l'espace de Fourier), diélectrique homogène uniforme  
 étude réfraction en EM :  $k$  parallèle à l'interface est identique,  $\omega$  aussi,  $k$  perpendiculaire peut être complexe

## 2 Ondes évanescentes au sens large

### 2.1 Élargir à d'autres domaines de la physique

effet de peau, plasma autres exemples en physique (pas sûr) :  
 ondes évanescentes thermiques  
 dissipation de la quantité de mouvement dans un fluide visqueux

## 2.2 Ondes évanescentes de matière : effet tunnel

marhce de potentiel  
résolution dans les 3 zones

## 3 Applications

### 3.1 Microscopie en champ proche

SNOM  
sonde : guide d'onde

### 3.2 Microscope à effet tunnel

STM

### 3.3 Détection d'empreintes digitales

réflexion interne frustrée  
(également : couplage entre guides d'onde, détecteur de rosée...cf mon projet ETI IOGS)

## Conclusion

partout, application technologique intéressante

### Remarques

- [thèse de Claire Li](#) [1], chap2
- plasmon de surface et plasmon de volume : filtre, couleurs et compagnie..
- imagerie par résonance de plasmon...
- le test de grossesse : première application bioplasmonique (voir slides Jerome Wenger)
- capteur à résonance plasmon de surface (configuraiton de Otto ou Kretschmann)
- traitement photothermique du cancer
- évanescent ne veut pas toujours dire décroissance exponentiel : exemple avec effet tunnel et barrière par rectangulaire (WKB...); autre exemple barrière coulombienne...
- déplacement de Goos-Hiinchén (TD d'électromagnétisme de Jeremy Neveu)
- effet de peau : dissipation, sinon pas de dissipation

# Oscillateur harmonique : approximation et limitations

Niveau CPGE

Prérequis

- PFD
- loi des mailles
- équations différentielles

**Message** L'OH c'est partout, c'est la vie. Points importants : conservation énergie mécanique, équipartition de l'énergie, isochronisme des oscillations, oscillations sinusoïdales perpétuelles.

**Bibliographie**

## Introduction

Comment est défini le temps? oscillateur naturel

## 1 Étude d'un oscillateur harmonique

### 1.1 Observations

expérience : masse sur coussin d'air avec 2 ressorts  
beau schéma de l'expérience

### 1.2 Mise en équation

PFD à m dans R galiléen projeté sur l'axe Ox

Force de droite  $\vec{F}_d$  Force de gauche  $\vec{F}_g$  ED  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{2k}{m}}$  solution  $x(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$  conditions initiales :  $x(0) = x_0$ ,  $\dot{x}_0 = 0$  représentation graphique  $x = f(t)$ , oscillations, période

### 1.3 Énergie

cinétique et potentielle

définition énergie potentielle élastique  $\vec{F}_{ressort} \cdot \vec{e}_x = -\frac{\partial E_{pot}}{\partial x}$

$$E_{pot} = 2 \times \frac{1}{2} k x^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \text{ moyenne : } \langle E_c \rangle = \frac{1}{2} k x_0^2 = \langle E_{pot} \rangle$$

épartition de l'énergie

présentation portrait de phase (normalisé) : cercle, sens

acquisition de la position sur logiciel Tracker

tracé portrait de phase : on observe une spirale

transition



## 2 Approximations et limitations

### 2.1 Oscillateur harmonique amorti

comment prendre en compte cet amortissement

Prise en compte d'une force supplémentaire : force de frottement fluide  $\vec{F}_{frott} = -\alpha \vec{v} = -\alpha \dot{x} \vec{e}_x$

équation différentielle :  $\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{x} + \omega_0^2 x = 0$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{2k}{m}}$

facteur de qualité  $Q = \frac{m\omega_0}{\alpha}$

résolution avec exponentielle complexe, racines de l'équation caractéristique...

$x(t) = x_0 \exp\left\{-\frac{\omega_0}{2Q} t\right\} \cos \omega_0 t + \varphi$

On voit le rôle du facteur de qualité dans les oscillations

### 2.2 Amplitude des oscillations

pendule simple

comportement similaire

mesure période : amplitude faible vs amplitude forte

1 seconde d'écart, il y a une influence : surprenant, différent d'avant

Etude : résolution avec l'énergie

approximation  $\sin \theta \approx \theta$

$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0$  avec  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$

isochronisme des oscillations en théorie, ne dépend pas de l'amplitude : bizarre → un autre modèle

en fait l'énergie potentielle est en cosinus, on l'a approché par une parabole

allure  $\frac{T}{T_0} = f(\theta_0)$  (parle pas de la formule de Borda)

portrait de phase : n'est plus circulaire, va être en forme d'ellipse

perte d'isochronisme des oscillations

approximation non vérifiée

## Conclusion

diapason, oscillateur à quartz fonctionne pareil, oscillation des bras, s'atténue très peu dans le temps

mais facteur de qualité :  $10^6$

pour améliorer : utilisation de résistance négative avec condensateur

### Remarques

- trop de temps sur les bases, mettre masse-ressort en prérequis
- faire l'amortissement en slide, vite fait, détails en TD
- écrire tous les messages importants, conditions initiales, notation  $x$  point...
- oscillations autour d'un puits de potentiel : très important, le faire plus tôt
- niveau : début de première année de CPGE
- si un seul ressort : cette manipulation ne marche pas, il faut contraindre la masse mais ne pas rajouter de frottement, donc on choisit de mettre deux ressorts, ne change rien, juste valeur de la pulsation, position d'équilibre ne va pas être au milieu

- il faut dire que l'oscillateur harmonique est un modèle idéal, mathématique, c'est défini par cette équation différentielle
- vraie pour bcp de situations physiques : au voisinage d'une position d'équilibre (dérivée énergie potentielle est nulle), ne marche pas lors de bifurcation fourche par exemple (dérivée seconde de l'énergie potentielle est nulle)
- énergie potentielle élastique : énergie stockée dans le ressort
- OH à plusieurs dimensions?
- équipartition vraie tout le temps? fait référence à quelque chose?  $\frac{1}{2}k_B T$  par degré de liberté
- utilité du portrait de phase : comprendre les échanges énergétiques dans le système
- espace des phases : formalisme hamiltonien, espace des coordonnées  $q_i$  et impulsions  $p_i$
- pourquoi frottement fluide? air visqueux sous la masse, dans le coussin d'air, si nombre de Reynolds faible dans cette couche
- autres dissipations possibles : ressort, ou liaisons, potence...
- trajectoire dans le cas d'un frottement solide? ce ne serait plus sinusoïdal
- formule de Borda; si on veut aller plus loin? terme suivant en  $\theta_0^4$  car parité (symétrie pendule)
- contre-exemple parité : force newtonienne autour de sa position d'équilibre
- différents régimes : apériodique, pseudo-périodique
- résumé : conservation énergie mécanique, équipartition de l'énergie, isochronisme des oscillations, oscillations sinusoïdales perpétuelles
- quantique : énergie quantifiée  $E_n = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega_0$ , valeurs propres du hamiltonien, énergie minimale  $\frac{\hbar\omega_0}{2}$
- classique : varie entre 0 et énergie mécanique

Leçon

59

# Filtrage linéaire

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Niveau Licence

Prérequis

- cinématique relativiste
- mécanique classique
- optique ondulatoire

**Message** Tout type d'ondes. Sirènes qui s'approche/s'éloigne, radar voiture et redshift des étoiles qui s'éloignent.

Bibliographie

## Introduction

prononcer Christiane Doppler (autrichien)  
 fréquence du son détermine sa hauteur (grave/aigu)  
 émetteur en mouvement : son différent  
 on le voit avec sirène qui se déplace  
 parler de monsieur Doppler, proposer mais faux car pas relativité prise en compte  
 on va le traiter quantitativement

## 1 Effet Doppler classique

$S$  : source d'ondes à la fréquence  $\nu_0$ , vitesse  $\nu_S$   
 $R$  : récepteur, reçoit à  $\nu_1$ , vitesse  $\nu_R$   
 $c$  : célérité des ondes  
 $\vec{u}$  : vecteur unitaire entre  $S$  et  $R$

### 1.1 Source mobile, récepteur fixe

première impulsion :  $t'_1 = t_1 + \frac{d_1}{c}$   
 deuxième impulsion :  $t'_2 = t_2 + \frac{d_2}{c}$   
 $T_0 = t_2 - t_1$  et  $T' = t'_2 - t'_1$  :  $T' = T_0 + \frac{d_2 - d_1}{c}$   
 calcul ...  
 hyp :  $\vec{u}$  ne bouge pas trop

$$f' = f_0 \frac{1}{1 - \frac{\vec{v}_S \cdot \vec{u}}{c}}$$

Source s'éloigne de  $R$  :  $f' < f_0$  : le son est plus grave  
 Source s'approche de  $R$  :  $f' > f_0$  : le son est plus aigu

animation internet : un véhicule émet des ondes en se déplaçant  
 à l'avant du véhicule : fronts d'onde sont plus resserrés vers l'avant (aigu, longueur d'onde plus faible), plus éloignés vers l'arrière (grave)

## 1.2 Source fixe, récepteur mobile

Astuce : changement de référentiel

$$f' = f_0 \left[ 1 - \frac{\vec{v}_R \cdot \vec{u}}{c} \right]$$

## 1.3 Formulation générale

$$f' = f_0 \frac{c - \vec{v}_R \cdot \vec{u}}{c - \vec{v}_S \cdot \vec{u}}$$

décalage Doppler  $\frac{\Delta f}{f_0}$

vitesse du son, avion supersonique, formation d'un cône de front d'onde, énergie s'accumule, onde de choc

## 2 Effet Doppler relativiste

transformée de Lorentz

étudier  $\omega$  et  $\vec{k}$   $f' = f_0 \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$

Formule de Doppler-Fizeau :  $f' = f_0 \gamma \left( 1 - \frac{\vec{v}}{c} \cdot \vec{u} \right)$

si la vitesse est perpendiculaire à l'axe  $\vec{u}$ ,  $f' = \gamma f_0 > f_0$

## 3 Applications

### 3.1 Mesure de vitesse : radar

détection hétérodyne

signal reçu :  $\omega_r$

signal émis :  $\omega_s$

multiplieur : on obtient  $\omega_r - \omega_s$  et  $\omega_r + \omega_s$

filtre passe-bas : on garde que le signal  $\omega_r - \omega_s$  expérience

### 3.2 Élargissement spectral

## Conclusion

décalage longueur d'onde d'une source lumineuse vers le rouge quand elle s'éloigne

application Doppler en médecine : radio qui mesure la vitesse du sang dans vaisseaux sanguins, ultrasons

### Remarques

- obligé de le mettre en niveau L3 et de faire relativiste
- l'expérience est incontournable
- ODG
- important : notion d'invariance, on change de référentiel, on retrouve la même physique, principe de relativité
- vitesse relative permet de ne traiter qu'un sens
- physiquement, sont-ce deux cas différents? non, l'un ou l'autre est immobile, le réfé-

rentiel est galiléen ou non, sans importance, c'est la vitesse d'entraînement de l'un par rapport à l'autre

- référentiel : ensemble de coordonnées d'espace-temps qui ont le même temps
- être clair sur la définition des vitesses, référentiels, hypothèses
- onde de choc en hydrodynamique : discontinuité de la pression qui se propage, voir la théorie
- décalage vers le rouge : contexte astrophysique non cosmologique
- dilatation des temps : démo avec un photon qui est réfléchi et qu'on "récupère" avec une vitesse de l'émetteur/récepteur
- pendant une période, source bouge
- faire modèle Newtonien de l'univers en expansion?
- référentiel d'inertie : seule configuration où  $\omega$  et  $k$  sont différents est l'effet Doppler
- référentiel accéléré : le nombre de particules détectées (étude quantique) dépend du référentiel, à la base du rayonnement thermique des trous noir
- effet Doppler sur ondes de matière : ondes sismiques, voir application
- radar
- Doppler application en médecine

Niveau CPGE

Prérequis

—  
—  
—  
—  
—  
—

Message .

Bibliographie

## Introduction

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—  
—

Niveau L3

Prérequis

- principe des moteurs à courant continu
- transformée de Laplace
- fonction de transfert
- amplificateur opérationnel
- diagramme de Bode

Message .

Bibliographie

- [1] *Electronique*. Hprepa.  
 [2] Jeremy NEVEU. *Electrocinétique*.  
 [3] *Physique PSI*. Tec et Doc.

## Introduction

on fait en permanence de la rétroaction dans la vie de tous les jours (quand on conduit...)

régulation : suivre une consigne constante quand il y a des perturbations

asservissement : suivre une consigne qui peut changer

réf.  
 [1],[2],[3]

## 1 Commande d'un système linéaire et nécessité d'une rétroaction

### 1.1

### 1.2

$$H_{FTBO} = \frac{\text{retour}}{\text{entre}} = A\beta$$

$$H_{FTBF} = \frac{\text{sortie}}{\text{entre}} = \frac{A}{1+H_{FTBO}}$$

## 2 Application : asservissement en vitesse d'un moteur

expérience : boîtier moteur à courant continu MCC

rétroaction : capteur dynamo

fonctions de transfert

2 entrées



## 2.1 Principe du moteur

## 2.2 Stabilité

critères

## 2.3 Précision

théorème de la valeur finale

## 2.4 Rapidité

AO : conservation du produit gain-bande (inutile ici)

## 3 Correction

proportionnel, intégrale, dérivateur

## Conclusion

oscillateur : pas d'entrée, addition  
systèmes biologiques  
laser

### Remarques

- ces notions ne sont pas au programme de CPGE
- faire pas beaucoup d'exemples mais très bien les faire, aller chercher les vieux livres de prépas PSI
- régulation : cas particulier de l'asservissement
- thermostat, perturbation : ouvrir une fenêtre en hiver par exemple
- qu'est ce qui fournit l'énergie? toutes les alimentations extérieures au circuit (AO, tension de commande)
- électronique de puissance vs électronique de signal : puissance à l'amplificateur, tout le reste signal; électronique de signal est plus précise que électronique de puissance
- si alimentation moteur pas précise, pas grave car relatif, si pb dynamo (moins précise par exemple), plus grave car pas la même valeur mesurée, seuils pas les mêmes, moins bien régulé?
- on se fout de la précision dans chaîne directe, pas dans la rétroaction
- ex perceuse, pas besoin asservi car s'auto-régule? on cherche une vitesse de rotation constante, donc régulation, automatisé pour avec une adaptation plus rapide, et plus de précision
- soustracteur : AO en amplificateur non-inverseur
- comment transformée de Laplace peut s'intégrer dans le programme CPGE? pourquoi choix L3? car il faut transformée de Laplace
- fonctions de transfert, hypothèses : système linéaire et vrai à tout amplitude

- pas différent de fonction de transfert avec AO, même résultat mais schéma-bloc : modèle pour simplifier
- qu'apporte la conservation du produit gain-bande? voir que la bande-passante s'agrandit si on a une rétroaction; et impact sur la rapidité
- en réalité, alimentation limite la tension de l'oscillateur à pont de Wien, saturation
- notion de stabilité : dans la pratique, on a toujours des choses qui vont limiter
- marges pour la sécurité : marges de gain et de phase; voir avec diagramme de Bode (gain inférieur à 1 en phase)
- étude du moteur en précision : commande en position ou vitesse?

Leçon

63

# Inductance : de l'électromagnétisme à l'électrocinétique

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

## Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

Niveau L3

Prérequis

- optique géométrique
- diffraction (critère de Rayleigh)
- fluorescence

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.

**Bibliographie**

- [1] Philippe COCHARD. *La microscopie confocale*. URL : <https://trigenotoul.com/wp-content/uploads/2014/09/Confocal-cours.pdf>.
- [2] HOUARD. *Optique, une approche expérimentale et pratique*.
- [3] Alfred KASTLER. *La technique du contraste de phase*, BUP 367-369.
- [4] Douglas MURPHY. *Introduction to phase contrast microscopy*. URL : <https://www.microscopyu.com/techniques/phase-contrast/introduction-to-phase-contrast-microscopy>.
- [5] Kenneth SPRING. *Introduction to fluorescence microscopy*. URL : <https://www.microscopyu.com/techniques/fluorescence/introduction-to-fluorescence-microscopy>.
- [6] Genevieve TULLOUE. *Figure animée d'un microscope*. URL : [https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/optiqueGeo/instruments/microscope.php?typanim=Javascript](https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/instruments/microscope.php?typanim=Javascript).

## Introduction

Microscope : appareil permettant d'étudier des détails microscopiques à une échelle macroscopique. Petit historique : utilisation systématique de lentilles grossissantes à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle. On veut : bon grossissement, bonne résolution, image fidèle (pas de défauts).

## 1 Microscope classique

### 1.1 Dispositif

### 1.2 Grossissement commercial

[2] p.154

### 1.3 Limites

résolution : diffraction, critère de Rayleigh

aberrations des lentilles : correction des aberrations chromatiques avec verre de champ et verre de l'œil

[2] p.161

**Transition :** Biologie échantillons transparents non colorés : compliqué.

## 2 Microscopie par contraste de phase

Vidéo Youtube Tout est quantique sur le champ sombre et contraste

[3]

Objet de phase :  $s_0 = V_0 \exp(i\omega t)$  et  $s = s_0 \exp(i\varphi)$

[4]

- Strioscopie : on coupe  $s_0$ , donc on obtient  $I = I_0 \varphi^2$ . Problèmes : contraste très faible
  - Contraste de phase :  $s_0$  retardé de  $-\pi/2$  (lame de verre d'épaisseur  $n\lambda + \lambda/4$  par exemple), on obtient  $I \approx I_0(1 - 2\varphi)$ . Alors  $C = |2\varphi|$ . Prix Nobel 1953 Zernike
- Avantages : méthode non destructive, non intrusive. On peut observer du vivant!

**Transition :** Observer parties spécifiques ou échantillon épais : 3D

### 3 Microscope confocale laser à fluorescence

Fluorescence : fluorophores dans l'échantillon (qui se fixent spécifiquement). [1]  
 Confocale laser : image point par point [5]  
 Importance du miroir dichroïque. C'est là l'intérêt de la fluorescence : on peut facilement éliminer la lumière diffusée.

### Conclusion

méthodes non optiques : STM, AFM, MEB, TEM  
 résolution nanométrique et sub

#### Remarques

Détails sur le microscope à contraste de phase

- Éclairage de Köhler : il permet d'éclairer l'échantillon de manière uniforme, et de ne pas avoir le filament superposé à l'échantillon (ce que l'on fait habituellement pour avoir la meilleure luminosité). Solution : faire l'image de la source sur le diaphragme d'ouverture du condenseur (ici le "condenser annulus"), qui est dans le plan focal objet du condenseur.
- L'anneau de phase est placé dans le plan focal image de l'objectif, et c'est bien le plan de Fourier (on a bien un éclairage parallèle sur l'échantillon). Ce système conjugue ainsi le "condenser annulus" et le "phase plate". Par ailleurs l'objectif fait l'image de l'échantillon sur l'écran.
- Pour bien comprendre le schéma, il faut voir que les traits sont des rayons (le coloriage entre traits est en fait plus perturbant qu'autre chose), et lorsqu'ils se recoupent on peut voir où est formée l'image de tel ou tel objet.

# Interférences à deux ondes en optique

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.



# Diffraction par des structures périodiques

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Absorption et émission de la lumière

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Leçon 70 Laser

Niveau L3

## Prérequis

- Oscillateurs électroniques
- Equation de Schrödinger
- Electromagnétisme dans les milieux diélectriques
- Interféromètres de Michelson et Fabry Pérot
- Effet Doppler
- Forme des orbitales atomiques

Message ..

## Bibliographie

- [1] DANGOISSE. *Lasers, cours et exercices corrigés*.
- [2] HOUARD. *Optique, une approche expérimentale et pratique*.
- [3] B Cagnac et JP FAROUX. *Lasers : interaction lumere-atomes*.
- [4] Marie-Noelle SANZ. *Physique tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2016.
- [5] SEXTANT. *Optique expérimentale*.

## Introduction

LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation  
Source lumineuse omniprésente et très utile : Cohérente, monochromatique, faisceau parallèle et concentré

[3]

[2] ch11

[5] ch4

[1]

[4] ch30-31

## 1 Principe de fonctionnement

### 1.1 Rappel oscillateur électronique

Condition de Barkhausen

### 1.2 Principe du Laser

## 2 Amplification par émission stimulée

### 2.1 Système à deux niveaux

Hyp : 2 niveaux d'énergies non dégénérés (a, b) interagissent avec le champ électromagnétique  
Fonction du système : ...

### 2.2 Coefficients d'Einstein. Emission stimulée

Grâce au développement de la partie précédente nous pouvons obtenir l'équation d'Einstein  
Condition pour avoir émission stimulée ...

## 2.3 Pompage

## 3 Cavité résonnante

### 3.1 Cavité Fabry Péro

### 3.2 Application : le LIDAR

exploite leffet doppler

### 3.3 Le Laser stationnaire

Point de fonctionnement du laser et raies transmissent par le laser...

## Conclusion

Laser : oscillateur optique

Amplification par émission stimulée découle de l'éq de Schrödinger

Filtrage peut être effectué par une cavité Fabry-Pérot

Ouverture sur les lasers semi-conducteurs

### Remarques

- nb de pics et largeur de raies typique d'un laser : dépend de la largeur du gain et de la largeur des pics issus du Fabry-Pérot  $10^{10}Hz$  à  $10^{15}Hz$ . On peut mettre un filtre pour sélectionner le mode qui nous intéresse (filtre de Llyot) et rendre aussi le laser monomode. Pour rendre un laser monomode on peut aussi jouer sur la taille de la cavité
- taille cavité FP laser semiconducteurs : ordre du mm au m (rq pour laser He-Ne de l'ordre de 17cm). Pour ces lasers le gain est plus relativement homogène, il est plus facilement monomode
- laser à solide : milieu = cristal (par ex  $Al_2O_3$ ) les électrons sont excités, pertes non radiatives dans le réseau cristallins puis désexcitation. Le gain est plus homogène. Le gain sature sur l'ensemble de la courbe et un seul mode lase. Pour un laser à gaz, le gain est inhomogène et le gain va saturer pour chaque groupe d'atomes faisant partie de la même classe de vitesse. Plusieurs modes vont pouvoir lase. Le plus connu Nd :YAG (ophtalmologie, nettoyage de façade cf : cest pas sorcier)
- laser les plus connus et applications : He-Ne, Argon, Xénon, Crypton, Diode laser (lecteur CD), semi-conducteur (utilisés dans toutes les télécommunications, fibre optique, téléphone, internet). Rq : les lasers à gaz ne sont pas les plus utilisés, juste pour l'enseignement et en métrologie car ils sont plus stables. Mesure distance Terre-Lune, LIDAR, Correction de la myopie
- laser à impulsion : on apporte de l'énergie en permanence (le gain augmente, mais on s'arrange pour qu'il y ait plus de pertes que de gain). En pratique on peut utiliser des cellules de Pockels dont on peut contrôler l'indice optique et la biréfringence avec la tension appliquée. En les associant avec un polariseur à  $45^\circ$  des axes neutres, on peut en faire des interrupteurs contrôlés électriquement. On arrive ainsi à obtenir une très forte inversion de population et de stocker de l'énergie dans le milieu à gain. On commute les pertes → Très forte inversion de population pour ramener le gain = pertes, libère bcp de photon
- revoir gain en fonctionnement stationnaire, gain quand I non nul, gain en fonction de I

Leçon  
**71**

# Instruments d'optique (hors microscopes)

Niveau L3

Prérequis

- optique géométrique
- diffraction

**Message** Un instrument optique s'utilise dans certaines conditions pour lesquelles il a été conçu. Il y a toujours des limitations, des compromis.

**Bibliographie**

- [1] HECHT. *Optique*.
- [2] HOUARD. *Optique, une approche expérimentale et pratique*.
- [3] PEREZ. *Optique : fondements et applications*.

## Introduction

Les instruments d'optique sont omniprésents dans la vie quotidienne, par exemple pour la plupart d'entre nous possédons des lunettes. Mais il y a d'autres applications en physique plus fondamentale comme les télescopes. Mais aussi pour sonder la matière mais qu'on étudiera pas ici, les microscopes. [2]

Autres biblio possibles [1], [3]

## 1 Appareil photo à focale fixe

### 1.1 Rappels sur les grandissements

### 1.2 Tirage de l'objectif et mise au point

Def; mise au point : action qui consiste à rendre l'image nette

### 1.3 Profondeur et distance hyperfocale

## 2 Lunette astronomique

### 2.1 Caractéristiques

Lunette : système afocal : objet à l'infini renvoi une image à l'infini

### 2.2 Cercle oculaire

Def; image de l'objectif par l'oculaire, endroit où tous les rayons issus de l'objectif par l'oculaire se regroupent Contient toute l'information sur l'objet, c'est l'endroit où l'on doit placer son il

### 3 Limitations

#### 3.1 Limite de résolution

#### 3.2 Aberrations

chromatique : verre=milieu dispersif, utilisation géométriques : coma, astigmatisme et courbure de champ, distorsion

### Conclusion

#### Remarques

notion du grain du récepteur : pixel..

résolution

CCD ou CMOS

photo couleur : 3 pixels RGB, pixels peuvent être superposés

appareil photo infos : N, tirage et temps d'exposition

téléobjectif : plusieurs lentilles, donc plusieurs diaphragmes, donc perte de luminosité et plus d'aberrations

corriger aberration chromatique : doublets achromatique flint-crown

corriger aberration géométriques : diaphragmes pour centrer la lumière sur l'axe ; aberrations sphériques on peut aussi utiliser un doublet ; aberrations de coma il faut que les lentilles soient parallèles à l'axe optique. En pratique, toujours un compromis, optimisation, simulations Monte-Carlo

télescope c'est fait avec des miroirs et une lunette avec des lentilles

pas d'ab chromatique avec miroir

télescope : meilleure résolution ; taille 20m pour le plus grands

placés hors des villes pour éviter la pollution lumineuse et au sommet des montagnes pour diminuer les perturbations atmosphériques ; puis optique adaptative

Niveau CPGE

Prérequis

Message .

Bibliographie

## Introduction

### 1 Étude d'un spectre discret d'émission

#### 1.1 Réseau

#### 1.2 Dispositif expérimental

#### 1.3 Limites

### 2 Spectroscopie interférentielle

#### 2.1 Michelson

#### 2.2 Finesse d'une raie

#### 2.3 Spectroscopie par transformée de Fourier

### 3 Spectroscopie d'un spectre d'absorption

#### 3.1 Phénomène mis en jeu

#### 3.2 Spectres d'absorption

mode de vibration, de rotation

## Conclusion

Autres : RMN (radiofréquences), spectroscopie de masse, spectroscopie électronique (LEEDS)

# Lois de l'optique géométrique

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message**

Principes fondateurs de l'optique géométrique : pierres de base pour toute la conception optique, microscopie, télescopes et lunettes... Négliger interférences et diffraction : longueur à partir du cm. On en dégage des lois simples.

**Bibliographie**

## Introduction

### 1 Réflexion et réfraction

#### 1.1 Lois de Snell-Descartes

#### 1.2 Principe de Fermat

### 2 Systèmes optiques

#### 2.1 Conditions de Gauss

#### 2.2 Lentilles

### 3 Applications

#### 3.1 Prisme

#### 3.2 Mirages

#### 3.3 Arc-en-ciel

## Conclusion



Leçon  
**74**

# Production et analyse de la lumière polarisée

Niveau L3

## Prérequis

- aspect ondulatoire de la lumière
- physique des ondes
- polarisation rectiligne et loi de Malus

**Message** lame quart d'onde et lame demi-onde au programme de PC.

## Bibliographie

- [1] HECHT. *Optique*.
- [2] HUARD. *Polarisation*.
- [3] Marie-Noelle SANZ. *Physique tout-en-un PC-PC\**. Dunod, 2016.

## Introduction

limites de l'optique géométrique  
interférences et diffraction : on a mis de côté l'aspect vectoriel de la lumière  
on s'y intéresse ici : description, production et analyse

réf.  
[3],[1],[2]

## 1 Production de lumière polarisée

### 1.1 Etats de polarisation de la lumière

Onde plane progressive harmonique OPPH  
Expression du champ électrique  
déphasage  $x,y$  dépend de  $t$  en générale : émission thermique, lampe à incandescence est aléatoire  
par exemple ; pour laser : déphasage constant  
on a alors : polarisation rectiligne, circulaire et elliptique  
vidéo Youtube avec propagation

### 1.2 Production de lumière polarisée par absorption

absorption : polariseur  
dichroïque  
visible : absorption par charges accélérées dans le matériau (en fait il y a peu de transmission, bcp de réflexion)

### 1.3 Production par diffusion

rayonnement dipolaire

## 1.4 Production par réflexion vitreuse

réflexion sur un dioptre

coefficients de Fresnel

angles de Brewster en polarisation TM :  $\tan i_B = \frac{n_1}{n_2}$  exemple pour le verre :  $i_b = 56^\circ$

## 2 Analyse d'une lumière polarisée

### 2.1 Biréfringence

Milieu isotrope : toutes directions ont même indice

Milieu biréfringent : définition, milieu qui possède deux indices de réfraction

soit uniaxe ( $n_o, n_o, n_e$ ), soit biaxe ( $n_o, n_e, n_e - 2$  axes optiques)

ex : le quartz est un milieu uniaxe

ie indice ordinaire et indice extraordinaire

ce qui nous intéresse ici : lame taillée parallèlement à axe extraordinaire

axes neutres, bien définir les axes

calcul  $\Delta\varphi$

Lame quart d'onde :  $\delta = \lambda/4$

### 2.2 Action d'une lame quart d'onde

incident rectiligne

cas général : polarisation elliptique

si  $\alpha = 0(\pi/2)$  pola rectiligne, si  $\alpha = \pi/4(\pi/2)$  circulaire

incident circulaire : après lame pola rectiligne

incident elliptique : pola rectiligne

## Conclusion

mind map disjonction des cas

application : lunettes de soleil, ailleurs dans le spectre électromagnétique : antennes radio

### Remarques

- la polarisation intervient dans interférences
- onde plane : la surface d'onde est plane
- progressive : elle se propage dans une direction
- on peut avoir des ondes stationnaires : pas de propagation apparente (compensation dues à conditions aux limites)
- harmonique : une longueur d'onde = monochromatique
- source idéale, laser s'en rapproche le plus
- une source dans la pièce, peut on considérer onde plane? non, quantifier avec atténuation, l'amplitude décroît en  $A/r$
- onde plane pour source éloignée : il faut  $r > \lambda$  et  $r > a$
- k E B trièdre : toujours vrai? non : c'est Poynting, E, H; k, D, B; k et E ne sont pas orthogonaux dans un milieux avec des charges
- elliptique droite ou gauche? si on prend dans le plan  $z = 0$ , on regarde le déplacement

- avec le temps, composantes  $E_{0,x}$  et  $E_{0,y} \cos(\varphi)$ ;  $\varphi$  entre 0 et  $\pi$  : gauche; entre 0 et  $-\pi$  : droite
- polarisation par diffusion : dipôle oscille, pas d'émission dans l'axe du dipôle, il n'y a pas de composante orthoradiale
- réflexion vitreuse dans le cadre de programme PC, diffusion aussi
- axe neutre d'une lame : une polarisation rectiligne reste rectiligne
- lame à retard : définie à une longueur d'onde donnée
- $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n e$  : plus  $\Delta n e$  est grand, moins on est sensible à  $\lambda$ , tant que multiple impair de  $\frac{\lambda}{4}$
- voir animation Arnaud + code Python
- comment dépolariser la lumière : sur un spectre large une  $\lambda/4$  avec une grande épaisseur ou sur un laser activité optique différente spatialement (prisme de Wollaston, Babinet)
- $\frac{\lambda}{2}$  est intéressante aussi : rotation d'une polarisation rectiligne
- Brewster astucieusement : un dipôle dans la matière est excité, il n'y a pas de réémission dans l'axe
- uniaxe positif :  $n_e > n_o$ , axe lent : axe extraordinaire (vitesse plus faible) = AO

# Optique de Fourier

**Niveau** L3**Prérequis**  
—**Message** .**Bibliographie**

## Introduction

réf. []

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

**Remarques**

—  
—  
—  
—  
—

Leçon

76

Photographie

Niveau CPGE

Prérequis

- 
- 
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

Introduction

- 1
  - 1.1
  - 1.2
- 2
  - 2.1
  - 2.2
- 3
  - 3.1
  - 3.2

Conclusion

Remarques

- 
- 
- 
- 
- 
-

**Niveau** CPGE**Prérequis**

—  
—  
—  
—  
—  
—

**Message** .**Bibliographie**

## Introduction

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

**Remarques**

—  
—  
—  
—  
—  
—

Leçon

78

# Optique de Fourier

Niveau L3

Prérequis

---

Message .

Bibliographie

## Introduction

réf. []

### 1

#### 1.1

#### 1.2

### 2

#### 2.1

#### 2.2

### 3

#### 3.1

#### 3.2

## Conclusion

Remarques

—  
—  
—  
—  
—

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.



Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Confinement d'une particule et quantification de l'énergie

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.

**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

Niveau CPGE

Prérequis

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

**Niveau** L3**Prérequis**

- mécanique du point
- équation de Schrödinger

**Message** Depuis 2500 ans l'homme s'attache à comprendre la structure de la matière. Les développements de la mécanique quantique au cours du 20ème siècle ont permis d'établir le modèle d'aujourd'hui.

**Bibliographie**

## Introduction

### 1 Approches antérieures

#### 1.1 De l'Antiquité aux modèles semi-classiques

#### 1.2 Modèle de Bohr

#### 1.3 Conséquences et limites

### 2 Modèle actuel

#### 2.1 Équation de Schrödinger

#### 2.2 Introduction aux nombres quantiques

#### 2.3 Spin et structure de l'atome

## Conclusion

# Expérience de Stern-Gerlach et conséquences

Niveau L3

Prérequis

— théorie quantique du moment cinétique

Message .

Bibliographie

## Introduction

passage classique à quantique au 20ème siècle  
 c'est une expérience décisive dans cette théorie : aspect quantique des atomes et découverte du spin de l'électron  
 à l'époque on parlait du modèle de Bohr

## 1 Modèle de Bohr

### 1.1 Rapport gyromagnétique

électron en trajectoire circulaire autour d'un noyau  
 boucle de courant  $I$ , calcul du moment magnétique (analogie spire de courant) :  $\vec{M} = I\vec{S} = \dots = \frac{ev}{2}\vec{u}_z$   
 moment cinétique :  $\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p} = -m_e r v \vec{u}_z$   
 $\vec{M} = \gamma \vec{L}$   
 Rapport gyromagnétique :  $\gamma = -\frac{e}{2m_e}$

### 1.2 Précession de Larmor

Champ magnétique  $\vec{B}_{\text{ext}}$   
 Théorème du moment cinétique, système d'équations couplées x, y, on complexifie (x partie réelle et y partie imaginaire)  
 $L = L_x + iL_y$  donc  $\frac{dL}{dt} = -i\gamma B_0 L$   
 $L = L_0 \exp(-i\gamma B_0 t)$   
 pulsation de Larmor :  $\omega_L = -\gamma B_0$   
 schéma précession  $\vec{L}$  autour de l'axe du champ magnétique

## 2 Expérience de Stern et Gerlach

### 2.1 Description

Schéma expériences  
 récipient chauffé (four) permet d'injecter atomes d'argent

une fente permet d'avoir seulement ceux dans une direction ( $x$ )  
 aimant Nord/Sud de longueur  $l$ , situé à distance  $D$  de l'écran  
 particule vont être déviées par champ magnétique  
 champ  $B$  inhomogène suivant  $z$  grâce à structure de l'aimant (sud pointe, nord trou)  
 si  $B$  était constant, le champ serait nul car  $\vec{F} = (\vec{M} \text{grad}) \vec{B}$

invariance par translation

$$F_z = M_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

PFD dans l'entrefer :  $x = vt \dots$

$$Z = D \tan \alpha = \frac{Dl}{m_{Ag} v^2} M_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

[Video Youtube quantique Stern et Gerlach](#)

## 2.2 Résultats

$B_0 = 0$  : gaussienne centrée en  $z = 0$

$B_0 \neq 0$  : prévision classique réponse plate, constante, pas d'angle favorisé, fonction porte

$B_0 \neq 0$  : observations 2 taches symétriques par rapport à  $z = 0$

## 3 Conséquences

### 3.1 Quantification du moment cinétique

moment cinétique total, moment cinétique orbital, moment cinétique intrinsèque

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

il existe un vecteur  $\vec{u}_z$  tel que  $J_z$  et  $\vec{J}^2$  commutent

propriétés des moments cinétiques, rappel nombres quantiques,  $j$  et  $m$  sont entiers ou demi-entiers, certaines transitions autorisées

### 3.2 Retour sur l'expérience

deux taches : 2 valeurs de  $m$  possibles

$$J = \frac{1}{2} \text{ et } m = \pm \frac{1}{2}$$

$$M = \pm \mu_B \text{ où } \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ A.m}^2 : \text{quantum de moment magnétique}$$

$$\text{facteur de Landé : } g_L = \frac{\mu_B}{\gamma \hbar} = 2$$

### 3.3 Application à l'effet Zeeman

$$E_p(m) = -\vec{M} \cdot \vec{B} = g \mu_B m B_0$$

$$E = E_0 + g \mu_B m B_0$$

$2J + 1$  états

$$\text{sous-niveaux Zeeman } \Delta E = E(m+1) - E(m) = g \mu_B B_0 \propto B_0$$

applications : résonance magnétique nucléaire (RMN) du proton dans IRM

## Conclusion

On attribue structure probabiliste de l'atome et existence du spin

### Remarques

- meilleur plan : commencer par les résultats de l'expérience?
- avoir les dates en tête
- pourquoi atomes d'argent? car gros atome à symétrie de révolution + 1 électron célibataire non apparié
- pas un électron seul car effet cyclotron domine
- attention aux lignes de champ dans électro-aimant
- électron : facteur de Landé 2 et spin demi-entier
- théorie classique : continuum; vs quantification spatiale du moment cinétique (voir schéma poly Jean Hare)
- parler de Pauli et des matrices
- paquet d'onde s'élargit par diffraction; en vrai c'est en forme d'il car atomes passent pas les côtés mais y a bien deux directions privilégiées
- axe de quantification arbitraire car symétrie cylindrique; quand on applique le champ  $\vec{B}$ , on brise la symétrie
- voir vidéo Youtube MIT?

Leçon  
**85**

# Equation de Schrödinger et applications

Niveau CPGE

Prérequis

- optique ondulatoire
- 
- 
- 

Message .

Bibliographie

## Introduction

on a vu relation onde - corpuscule, longueur d'onde de De Broglie  
 expérience introductive : diffraction des électrons  
 accélération des électrons par tension  
 sur graphite, diffraction comme un réseau en optique  
 matière est une onde!  
 comment décrire ces états?

Slide dualité onde-corpuscule : relation de De Broglie  $\lambda_{db} = \frac{h}{p}$  ; pour des électrons accélérés :  
 $\lambda_{db} = \frac{rd}{l}$

## 1 État et évolution d'une particule

### 1.1 Fonction d'onde

$\psi(M, t)$ , valeurs complexes, interprétation : amplitude de probabilité de trouver la particule à un instant donné  
 Dans un volume  $dV$  centré sur  $M$  à l'instant  $t$ , la probabilité est :  $dP = |\psi(M, t)|^2 dV$   
 caractère probabiliste  
 propriété importante, loi de conservation : intégré sur tout l'espace, on obtient 1 puisqu'on sait que cette particule existe  
 Comment étudier son évolution dans le temps?

### 1.2 Équation de Schrödinger

1925  
 on étudie ici à 1D  
 $\psi = \psi_0 e^{i\omega t}$   
 $E = \hbar\omega = \frac{p^2}{2m} + V$  ;  $c = \lambda_{db}\nu$   
 on part de l'équation de propagation et on démontre Schrödinger :  $E\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$



forme générale avec opérateur (pas démontrée ici) :  $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$

connaissance de l'évolution de la fonction d'onde

équation linéaire : si on a deux solutions, toute combinaison linéaire est alors solution

## 2 Solutions

### 2.1 Cas libre

$V = 0$ , on cherche des solutions stationnaires  $\psi = \phi(x)f(t)$

on les appelle états stationnaires

démonstration à partir de normalisation dans l'espace, et  $f(t) = e^{-i\omega t}$

$$\psi'' + \frac{2m\omega}{\hbar} \psi = 0$$

$$K = \sqrt{\frac{2m\omega}{\hbar}} : \text{pulsation spatiale}$$

### 2.2 Cas d'une barrière de potentiel

3 zones

énergie supérieure ou inférieure à  $V_0$ ...

## 3 Applications

### 3.1 Effet tunnel

courant de probabilité (simplifié pour CPGE) :  $\vec{j} = \frac{\hbar \vec{k}}{m} |\psi|^2$

slide : radioactivité  $\alpha$ , He franchit une barrière de potentiel par effet tunnel

microscope à effet tunnel : sonder la matière à l'échelle nanométrique et manipulation d'atomes

[vidéo réalisée image par image](#)

## Conclusion

ne prend pas en compte effets relativistes

### Remarques

Améliorations :

- plutôt introduire l'équation de Schrodinger à partir de l'énergie cinétique et énergie potentielle
- faire une seule particule
- qqch de complètement différent de classique
- probabilité de présence? pas exactement, c'est qqch qui nous permet de déterminer la proba
- champ de l'espace et du temps défini en tout point
- aspect dynamique pour évolution temporelle : on a longueur d'onde de de broglie, vecteur d'onde, le même que Fourier; consiste juste à établir relation de dispersion
- on a psi à un moment donné : on intègre, alors on l'a à n'importe quel instant
- on s'intéresse aux modes propres car solutions

- la mesure est un phénomène probabiliste
- hypothèses :  $\psi$  et  $\frac{d\psi}{dt}$  sont continus
- puits de potentiel est plus intéressant pour les aspects de normalisation

Questions :

- évolution d'un système quantique, tout système quantique? non
- particules élémentaires : photon, boson de Higgs, quark, électrons...
- ça marche pour le photon? non, pas de charge conservée, exemple corps noir : on crée des photons, oscillateurs
- c'est quoi le modèle standard?
- y a t'il des théories quantiques qui ne sont pas de la mécanique quantique?
- théorie quantique des champs? système à nombres de particules variables, qui s'ajustent
- au sens strict, la mécanique quantique relativiste n'existe pas
- passage à la mécanique classique? théorème d'Ehrenfest ou approximation WKB avec paquets d'onde

# Structure et stabilité des noyaux atomiques

**Niveau** CPGE**Prérequis**

— A

**Message** Message important à faire passer lors de la leçon.**Bibliographie**

## Introduction

**Écran**

Contenu affiché sur diapositives

**Remarques**

Remarque concernant le contenu

**Transition :** Belle transition entre deux parties ou sous-parties.**Expérience**

Expérience pour illustrer

**Attention**

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Capacités thermiques : description, interprétations microscopiques

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Approche microscopique du paramagnétisme et du ferromagnétisme

Niveau CPGE

Prérequis

— A

Message Message important à faire passer lors de la leçon.

Bibliographie

## Introduction

### Écran

Contenu affiché sur diapositives

### Remarques

Remarque concernant le contenu

Transition : Belle transition entre deux parties ou sous-parties.

### Expérience

Expérience pour illustrer

### Attention

Erreur faite souvent ou point sur lequel insister.

# Application des semiconducteurs à l'électronique et/ou l'optique

**Niveau** Licence

**Prérequis**

- physique statistique : distribution de Fermi-Dirac
- caractéristique d'une photodiode

**Message** Énormément utilisé dans les capteurs : on module la conduction pour faire plein de capteurs différents.

**Bibliographie**

## Introduction

plein d'applications, toute l'électronique qu'on utilise aujourd'hui

## 1 Propriétés des semiconducteurs

### 1.1 Bande de valence, bande de conduction et énergie de gap

Structure de bande

pour un semiconduteur énergie de gap inférieure à  $5\text{ eV}$

pour un isolant énergie de gap supérieure à  $5\text{ eV}$

A  $T = 0$ , tous les électrons sont dans la bande de valence

A  $T > 0$ , certains électrons passent dans la bande de conduction

densité de porteurs :  $n_e$  électrons présents dans le BC,  $n_h$  trous dans la BV

en pratique  $n_e = N_e e^{\left(\frac{E_g - E_c}{k_B T}\right)}$  et  $n_h = N_h e^{\left(\frac{E_g - E_c}{k_B T}\right)}$

### 1.2 Dopage

exemple : on part d'un silicium intrinsèque (4 électrons de valence)

on remplace des atomes de silicium par des atomes d'arsenic (5 électrons de valence, très peu)

change énergie de Fermi

dopé p : niveau de Fermi plus proche du haut de la bande de valence

dopé n : niveau de Fermi plus proche du bas de la bande de conduction

2 types de dopage : n → on ajoute des électrons, p → on ajoute des trous

## 2 La jonction PN

### 2.1 Présentation du phénomène

accoller matériau dopé p et matériau dopé n  
les électrons s'équilibrent sur la zone à la limite des 2  
vidéo Youtube : formation and properties of junction diode  
zone de déplétion : il y a ni trou, ni électron → la circulation est bloquée  
apparition d'un champ dans la ZCE, ie différence de potentiel :  $V_0 = E_F^N - E_F^P = \frac{k_B T}{e} \log \frac{N_a N_d}{n_i^2}$   
dans un circuit, on va donc polariser la jonction

### 2.2 Polarisation de la jonction

on applique une différence de potentiel à la jonction PN  
on change donc la différence de potentiel :  $V'_0 = V_0 - V_a$ , supérieure ou inférieure à  $V_0$   
caractéristique d'une diode  
illustration expérimentale avec une photodiode en changeant la résistance

## 3 Applications

### 3.1 Application à la photodétection de lumière : la photodiode

$V_a < 0$  : polarisation en inverse  
comment ça marche ?  
on récupère les électrons "produits" du côté zone p  
caractéristique : un photon excite un électron : création paire électron/trou  
définition courant photonique

### 3.2 Application à l'émission de lumière : la DEL (ou LED)

$V_a > 0$  : polarisation directe  
électrons injectés du côté zone n  
on peut faire des lasers  
vidéo fonctionnement

### 3.3 Application à l'électronique : le redresseur

signal sinusoïdal envoyé à une diode avec une résistance de protection  
lien avec signe diode, redressement

## Conclusion

on a présenté le cas le plus simple : jonction PN  
on peut aussi faire PNP et NPN : amplificateur de puissance  
on peut faire thermistance car passage des électrons est régit par une distribution de Fermi-Dirac,  
résistance va dépendre de température

présents partout : téléphones, caméra, ordinateur...

### Remarques

- donner des ordres de grandeur de gap pour différents matériaux
- intérêt de la photodiode PIN : augmenter artificiellement la taille de la ZCE. Ainsi, la majorité des photons y est absorbée. De plus, cette région intrinsèque étant pure (99.99% pour le silicium), la vitesse des porteurs y est significativement augmentée. En effet, ces derniers n'y subissent que très peu de collisions du fait de cette absence d'impureté
- bandes de valence, conduction et interdite : en physique des solides, on résout l'équation de Schrödinger, potentiel périodique du cristal ; la fonction d'onde d'un électron dans le cristal
- théorème de Bloch
- énergie en fonction du vecteur d'onde  $k$
- important à mettre : diagramme simplifié en fonction de  $k$ , paraboles
- gap direct/gap indirect
- pourquoi quand il y a des électrons dans bande de conduction il y a un courant électrique ?
- pourquoi parabolique ? car écart à l'électron libre  $\frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$
- dissymétrie en fonction de  $k$  :
- énergie de Fermi d'un conducteur, peuplement des niveaux d'énergie
- intrinsèque : non dopé ; utilisation : filtre optique (GaP), photorésistance (CdS), thermorésistance, sonde à effet Hall
- $E_g = \frac{hc}{\lambda_g} = \frac{1.24[eV]}{\lambda[\mu m]}$
- extrinsèque : dopé ; utilisation : transistor
- caractéristique de la photodiode : exponentielle ; zone génératrice, photovoltaïque : photopile ; si balayée trop rapidement (?), on observe des effets capacitifs
- $V_0 = 0,7V$  pour le silicium
- faire un courant alternatif : deux diodes en parallèle sens opposés
- ordre de grandeur des températures de Fermi des métaux, conducteurs :  $10^4 K$



Niveau Licence

Prérequis

- distribution canonique et grand canonique
- traitement microcanonique du gaz parfait
- postulat de symétrisation mécanique quantique
- notion de spin

Message .

Bibliographie

## Introduction

aspects quantique du modèle microcanonique du gaz parfait

## 1 Formalisme des statistiques quantiques

### 1.1 Rappel : résultat semi-classique

entropie de Sackur-Tetrode

$S > 0$  : limite diluée,  $n\Lambda^3 \leq 1$

quantique : recouvrement fonctions d'onde

### 1.2 Formalisme des statistiques quantiques

Pour un système de  $N$  particules identiques, les seuls états physiques sont antisymétriques car symétriques par échange de particules.

Boson, fonction d'onde symétrique par échange de deux particules, exemples : photon, He4

Fermion, fonction d'onde antisymétrique par échange de deux particules, exemples : électrons, proton

Le spin des fermions est demi-entier

Le spin des bosons est entier

exmple : 2 bosons dans 2 états  $a$  et  $b$ , écriture de l'état, + entre les deux fonctions d'ondes

2 fermions dans 2 états  $a$  et  $b$ , écriture avec un - entre les deux fonctions d'ondes

Application : principe d'exclusion de Pauli, deux fermions ne peuvent pas être dans le même état quantique

### 1.3 Factorisation de la fonction de partition (ensemble grand-canonique)

$T$  et  $\mu$  fixés,  $N$  particules

$$\Xi = \sum e^{\beta(E_l - \mu N_l)} = \sum \Pi \dots$$

formule de  $\langle N_\lambda \rangle$  en fonction de la dérivée de  $\ln(\xi_\lambda)$

## 2 Distribution de Fermi-Dirac et Bose-Einstein

### 2.1 Stat de Bose-Einstein

boson :  $N_\lambda = 0, 1, \dots, \infty$   
calcul de  $\xi_\lambda$

### 2.2 Stat de Fermi-Dirac

fermion :  $N_\lambda = 0$  ou  $1$   
calcul de  $\xi_\lambda$

tracé des deux caractéristiques en fonction de  $\beta(E_\lambda - \mu)$  : tendent vers la même valeur  
tendent vers la statistique de Maxwell-Boltzmann, expression

## 3 Applications

### 3.1 Rayonnement du corps noir

une boîte cubique  
conditions aux limites périodiques  
quantification des vecteurs d'onde  
calcul calotte sphérique  
ne pas oublier les 2 états de polarisation  
densité spectrale de modes  
on trouve la loi de Planck  
loi de Wien  
tracé pour différentes températures

### 3.2 Comportement des électrons libres d'un métal

équation de Schrödinger  
densité d'énergie, calcul, en  $E^{\frac{1}{2}}$   
à  $T = 0K$ , FD devient fonction de Heavyside  
 $N = AE_F^{\frac{3}{2}}$ , expression énergie de Fermi : de quelques eV à quelques 10eV

## Conclusion

### Remarques

- bien définir les fonctions de partition, tous les termes
- Sackur-Tetrode dans micro-canonique, en fait ici on a donné son expression dans l'en-

- semble canonique (fonction de  $N, V, T$ )
- théorie des champs : théorème spin statistique (hors programme)
- fonction d'onde :  $N$  fermions ou  $N$  bosons, déterminant de Slater
- loi de Planck : équilibre thermodynamique
- thermostat : parois
- loi du déplacement de Wien
- condensat de Bose : tous les bosons sont dans le même état, dans l'espace des  $k$ , refroidissement avec champ magnétique ou laser, la température est déterminée en fittant la "queue de la distribution" de population
- sphère de Fermi : sphère en vecteur d'onde qui correspond à l'énergie de Fermi
- masse de Chandrasekhar : masse limite au-delà de laquelle il y a effondrement gravitationnel, devient étoile à neutron
- supraconducteur : paire de Cooper