

[illegible]

2023-2024



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Gravitation</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Lois de conservation en dynamique</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide</b>	<b>9</b>
4.1	Modèle du fluide parfait . . . . .	9
4.1.1	Définition et dérivation . . . . .	9
4.1.2	Lignes de courant courbes, effet Coanda . . . . .	10
4.1.3	Limites . . . . .	10
4.2	Théorème de Bernoulli . . . . .	10
4.2.1	Énoncé et démonstration . . . . .	10
4.2.2	Aspect énergétique . . . . .	10
4.3	Tube de Pitot (et anémométrie) . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Premier principe de la thermodynamique</b>	<b>12</b>
6.1	Anne-Cécile va me trouver un titre . . . . .	13
6.1.1	Énergies et énergie interne . . . . .	13
6.1.2	Transformations . . . . .	14
6.1.3	Expression du travail . . . . .	15
6.2	Applications . . . . .	15
6.2.1	Calorimétrie . . . . .	15
6.2.2	Détente de Gay-Lussac . . . . .	16
6.2.3	Le réfrigérateur . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Transitions de phase</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Phénomènes de transport</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>Conversion de puissance électromécanique</b>	<b>19</b>
<b>10</b>	<b>Induction électromagnétique</b>	<b>20</b>
<b>11</b>	<b>Rétroaction et oscillations</b>	<b>21</b>
<b>12</b>	<b>Traitement d'un signal. Étude spectrale</b>	<b>22</b>

<b>13 Ondes progressives, ondes stationnaires</b>	<b>23</b>
13.1 Généralités sur les ondes . . . . .	23
13.1.1 Description phénoménologiques . . . . .	23
13.1.2 Dérivation de l'équation d'onde (D'Alembert) . . . . .	23
13.2 Ondes stationnaires . . . . .	24
13.2.1 Hypothèses et dérivation . . . . .	24
13.2.2 Exemple : la corde de Melde . . . . .	24
13.3 Ondes progressives . . . . .	24
13.3.1 Définition et dérivation . . . . .	24
13.3.2 Solution générale . . . . .	24
13.3.3 OPPH . . . . .	24
<b>14 Ondes acoustiques</b>	<b>25</b>
<b>15 Propagation guidée des ondes</b>	<b>26</b>
<b>16 Microscopies optiques</b>	<b>27</b>
<b>17 Interférences à deux ondes en optique</b>	<b>28</b>
17.1 Généralités sur les interférences à deux ondes . . . . .	28
17.1.1 Description . . . . .	28
17.1.2 Formalisme et expression mathématique . . . . .	29
17.2 Fentes de Young . . . . .	30
17.2.1 Dispositif expérimental . . . . .	30
17.3 Limites réelle et notion de cohérence . . . . .	30
17.3.1 Cohérence spatiale . . . . .	30
17.3.2 Cohérence temporelle . . . . .	30
<b>18 Interférométrie à division d'amplitude</b>	<b>31</b>
18.1 Intérêt de la division d'amplitude . . . . .	31
18.1.1 Division en front d'onde et division d'amplitude . . . . .	31
18.1.2 Cohérence spatiale et source étendue . . . . .	32
18.1.3 Théorème de localisation . . . . .	32
18.2 L'interféromètre de Michelson . . . . .	32
18.2.1 Configuration en lame d'air . . . . .	32
18.2.2 Configuration en coin d'air . . . . .	32
18.2.3 Expérience . . . . .	32
18.3 Applications de la division d'amplitude . . . . .	32
18.3.1 Mesure de d'indice optique . . . . .	32
18.3.2 Expérience LIGO-VIRGO . . . . .	32
18.3.3 Spectroscopie (Fabry-Perrot) . . . . .	32
<b>19 Diffraction de Fraunhofer</b>	<b>33</b>
<b>20 Diffraction par des structures périodiques</b>	<b>34</b>
<b>21 Absorption et émission de la lumière</b>	<b>35</b>
<b>22 Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques</b>	<b>36</b>
<b>23 Mécanismes de la conduction électrique dans les solides</b>	<b>37</b>

---

<b>24 Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique</b>	<b>38</b>
<b>25 Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités</b>	<b>39</b>
<b>26 Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley</b>	<b>40</b>
26.1 Électromagnétisme et transformation des vitesses . . . . .	40
26.1.1 Référentiels en physique galliléo-newtonienne . . . . .	40
26.1.2 Equations de Maxwell et propagation des ondes EM . . . . .	41
26.1.3 Expérience de Michelson et Morley . . . . .	42
26.2 Émergence de la relativité restreinte . . . . .	42
26.2.1 Postulats et transformations de Lorentz . . . . .	42
26.2.2 Conséquences . . . . .	43
26.2.3 Expérience des muons . . . . .	43
<b>27 Effet tunnel : application à la radioactivité alpha</b>	<b>44</b>

# 1. Gravitation

## **2. Lois de conservation en dynamique**

### 3. Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux

Niveau :

Pré-requis :

—  
—  
—

Bibliographie :

—  
—  
—

Commentaires du jury :

Expériences :



# 4. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Niveau : CPGE (2ème année)

**Pré-requis :**

- Hydrostatique
- Notions de champs
- Viscosité

**Bibliographie :**

- 
- 
- 

**Commentaires du jury :**

**Expériences :** Effet Coanda, Tube de Pitot

## Introduction

Alors on a vu précédemment comment on pouvait étudier les écoulements au travers des champs de vitesse et pression, on a vu que ces champs étaient régies par l'équation de Navier Stokes, les équations de NS en réalité. Néanmoins, c'est une équation qui en pratique est impossible à résoudre mais dans certains cas, comme on le verra on peut avoir une bonne description du fluide en négligeant sa viscosité, on verra dans quelle mesure cela reste vrai. C'est ce qu'on appelle le modèle de l'écoulement parfait d'un fluide.

## 4.1 Modèle du fluide parfait

### 4.1.1 Définition et dérivation

**Définition :** Un écoulement est dit parfait si tous les phénomènes diffusifs, en particulier la viscosité, sont négligeables.

Pour étudier ces écoulements, on va d'abord dériver la formule générale qui les régit. On considère un volume élémentaire de fluide  $d\tau = dx dy dz$ , pour le dessin on fera ça à deux dimensions, ce sera plus simple, et on va bêtement appliquer la seconde loi de Newton :  $ma =$  Somme des forces.

Pour la partie des gauche, c'est assez simple, on va exprimer  $a$  en fonction du champ de vitesse, qui dépend de ...

[Faire la démo]

améliorer la transition et prendre des notes

On aboutit alors à l'équation de Navier-Stokes présentée plus haut mais sans le terme incluant la viscosité.

### **4.1.2 Lignes de courant courbes, effet Coanda**

Maintenant on va s'intéresser à un cas un peu plus intéressant. Considérons un écoulement dont les lignes de courants sont courbes...

### **4.1.3 Limites**

Tout à l'heure on a introduit l'équation d'Euler...

## **4.2 Théorème de Bernoulli**

### **4.2.1 Énoncé et démonstration**

On réécrit l'équation d'Euler...

### **4.2.2 Aspect énergétique**

On considère le système suivant...

## **4.3 Tube de Pitot (et anémométrie)**

Le tube de Pitot est un dispositif qui permet de mesurer la vitesse de l'écoulement d'un fluide...

## 5. Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

# 6. Premier principe de la thermodynamique

Niveau : CPGE (1ère année)

**Pré-requis :**

- Aspects énergétiques méca.
- Concepts de base thermo.
- Modèle du gaz parfait

**Bibliographie :**

- T. Meyer, *La thermo. en prépa*, Ellipses
- M.-N. Sanz, *Physique tout-en-un*, Dunod
- B. Diu, *Thermodynamique*, Hermann

**Commentaires du jury :**

- **2017** : Des exemples concrets d'utilisation du premier principe de la thermodynamique sont attendus.
- **2015** : La notion d'équilibre thermodynamique n'est pas toujours bien comprise. Des exemples pertinents doivent être utilisés pour mettre en exergue l'intérêt du premier principe, y compris pour l'introduire.

**Expériences** : Calorimètre (voir exactement ce que tu peux faire), expérience de Joule (à essayer).

## Introduction

Le premier principe de la thermodynamique, déployé et mis en évidence au XIX<sup>e</sup> siècle grâce aux progrès technologiques et à l'essor des machines thermiques, est au coeur d'un grand nombre de mécanismes et de dispositifs. Il est en effet au coeur de toutes les transformations de l'Univers, aussi bien au sein des moteurs thermiques ou électriques qu'au coeur des nébuleuses qui se contractent pour former des étoiles. Ces processus, régulés par le premier principe de la thermodynamique, illustre une loi fondamentale de la physique : l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre, que l'on détaillera plus tard.

Dans cette leçon, justement on va essayer de comprendre ce premier principe en introduisant progressivement certains concepts clés : énergie interne, travail, chaleur, transformations, on verra ensuite les applications concrètes dans différents systèmes.

## 6.1 Anne-Cécile va me trouver un titre

### 6.1.1 Énergies et énergie interne

D'un point de vue mécanique, l'énergie totale d'un système est définie comme la somme de son énergie interne  $U$ , de son énergie cinétique globale, ou celle de son barycentre  $E_c$  et de son énergie potentielle, ou celle de son barycentre  $E_p$  :

$$E = U + E_c + E_p. \quad (6.1)$$

**Rappel :** L'énergie interne d'un système est elle-même la somme des énergies cinétiques et potentielles de ses constituants (à l'échelle moléculaire : énergie d'interaction, de vibration, de rotation etc.).

On relève deux propriétés de l'énergie interne (et de l'énergie totale) :

- $U$  (ou  $E$ ) est fonction d'état du système, c'est-à-dire qu'elle dépend des variables d'état ( $P, V, T \dots$ ) du système.
- $U$  (ou  $E$ ) est une grandeur extensive

Pour les besoins de cette leçon on rappelle également les définitions suivantes :

- Un **système ouvert** est un système qui permet des échanges d'énergie et de matière avec le milieu extérieur.
- Un **système fermé** peut échanger de l'énergie mais pas de matière.

Ainsi, on peut écrire qu'à tout système thermodynamique fermé ( $S$ ) est associé une fonction d'état  $E$  appelée énergie du système. La variation de  $E$  est égale à l'énergie reçue, que l'on prendra comme **positive** si effectivement reçue, **négative** si effectivement cédée. C'est un principe de conservation. On a donc :

$$\Delta E = E_f - E_i, \quad (6.2)$$

$$= \Delta(U + E_c + E_p). \quad (6.3)$$

A partir de là, notons que dans un système globalement au repos, ou dans un référentiel inertiel ( $\Delta E_c = 0$ ) et sans variation d'énergie potentielle ( $\Delta E_p = 0$ ), alors  $\Delta E = \Delta U$ . Ce sera le cas dans la plupart des exemples de la suite.

Maintenant, on se pose la question de savoir comment l'énergie d'un système peut varier et on va voir qu'il est impossible de comprendre cela dans le cas de la pure mécanique. Par exemple, je mets de l'eau dans une bouilloire électrique, que j'allume, mon eau chauffe, elle a gagné en énergie. Pour autant, aucun travail macroscopique n'a été délivré au système. C'est un aspect microscopique qui ne se comprend uniquement que dans le cadre de la thermodynamique : il a ce qu'on nomme un *transfert thermique*, que l'on note  $Q$  et qui va quantifier l'énergie apporté à un système autrement que par un travail mécanique. Le premier principe, qui ne traduit ni plus ni moins qu'un bilan d'énergie, s'écrit alors :

$$\Delta E = \Delta(U + E_c + E_p) = W + Q. \quad (6.4)$$

Une conséquence immédiate est que dans le cas d'un système dit **isolé** (i.e aucun échange d'énergie ni de matière avec l'extérieur)  $\rightarrow \Delta E = 0$ .

Ce principe énonce qu'il y a équivalence entre énergie de transfert thermique et travail fourni. C'est ce qu'a montré Joule dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Joule était fils de brasseur, ce qui l'a certainement aidé à avoir cette intuition et à l'aide d'une expérience où il faisait tourner des pâles dans un récipient calorifugé contenant un liquide, il a observé une élévation de la température du liquide sans apport de chaleur, simplement par l'apport d'un travail mécanique.

### 6.1.2 Transformations

Nous l'avons vu, la thermodynamique décrit l'évolution des systèmes, et étudie en particulier les variations d'énergie associées. On parle alors de transformation que l'on peut définir comme :

**Def :** Le processus par lequel un système passe d'un état initial à un état final. Les propriétés thermodynamiques d'un système, comme la pression, le volume, la température, peuvent varier au cours d'une transformation. Les transformations peuvent être classées selon divers critères, que l'on détaillera par la suite.

La variation d'énergie du système lors de cette transformation ne dépend que de l'état final et l'état initial du système et non pas du chemin parcouru :

$$\Delta U = U_f - U_i = W + Q, \quad (6.5)$$

ce qui est caractéristique d'une fonction d'état, comme nous l'avons dit au début. A l'inverse, le travail  $W$  et le transfert thermique  $Q$  apportés au système individuellement dépendent du chemin suivi et sont donc des quantités et non pas des variations. C'est donc une faute grave d'écrire :

$$\Delta U = \cancel{\Delta W} + \cancel{\Delta Q}, \quad (6.6)$$

De même, pour la forme différentielle :

$$dU = \cancel{dW} + \cancel{dQ} = \delta W + \delta Q, \quad (6.7)$$

où les  $d$  représentent des petites variations là où les  $\delta$  représentent des quantité élémentaires.

Quelques exemples de transformations usuels en thermodynamique :

- Isotherme  $T = cste$
- Isobare  $P = cste$
- Isochore  $V = cste$
- Adiabatique  $Q = 0$

On utilisera aussi souvent la notion de transformation quasi-statique qui mérite un peu plus de détail. Une transformation est dite quasi statique s'il est possible de la décomposer en une succession d'états d'équilibres très proches les uns des autres. Il s'agit d'une transformation lente (relativement temps de relaxation), de sorte que chaque équilibre puisse s'établir. Ex de masse sur un piston vs ajout progressif.

Pour rappel, l'équilibre est réalisé lorsque les variables macroscopiques et intensives du système ( $P, T, \mu, \dots$ ) ne varient plus ou suffisamment lentement relativement au temps de l'expérience pour être négligé. La durée entre l'instant où le système est préparé dans un état

hors-équilibre et l'instant où le système réalise l'état d'équilibre est appelé le temps de relaxation et est noté  $\tau$ .

Experimentalement, on constate que  $\tau_{\text{mécanique}} \ll \tau_{\text{thermique}}$ . Ainsi, on fera l'hypothèse les transformations rapides se font échanges thermiques (car ils n'ont pas le temps de se faire)  $\rightarrow$  elles seront considérées comme adiabatiques.

Pour finir cette sous-partie, on mentionnera la notion de **réversibilité**, qui ne peut être compris en profondeur que dans le cas de l'étude du second principe que l'on verra dans une autre leçon. Une transformation est dite réversible s'il est possible de "revenir en arrière". En réalité, la majorité des transformations sont irréversibles à cause de phénomènes dissipatifs comme les frottements mécaniques ou encore l'effet Joule et la dissipation de chaleur. C'est également le cas lorsqu'un système est soumis à un gradient, de température, de pression ou de concentration par exemple.

### 6.1.3 Expression du travail

Démo du Dunod pour aboutir à  $dW = -P_e dV$

illustration avec clapeyron isotherme/bare/chore/  $\rightarrow$  intro enthalpie (cf. elearning).

Illustration des concepts de moteur/recepteur (Dunod p. 845 3è édition)

Dans le cas électrique, on considère la puissance  $P = u(t)i(t)$  (par définition), on en déduit  $W = \int_{t_1}^{t_2} u(t)i(t)dt$

## 6.2 Applications

### 6.2.1 Calorimétrie

**Définition :** Un calorimètre est un récipient composé en général d'une paroi extérieure et d'une cuve, fermé par un couvercle permettant d'introduire un agitateur pour homogénéiser), un thermomètre et une résistance chauffante.

Sur le temps de l'expérience, on peut négliger les échanges thermiques avec l'extérieur  $\rightarrow$  système fermé.

Comme pression constante (contact atmosphère), on utilise enthalpie  $H$ .

**Méthode des mélanges**, pour déterminer la capacité thermique d'un solide<sup>1</sup> (cf. Dunod p. 852).

**MANIP ?**

Comment elle est déterminée la masse en haut du calorimètre ? Méthode électrique.

---

1. Mettre capacité thermique dans les PR

### 6.2.2 Détente de Gay-Lussac

Gaz parfait et gaz de van der waals (Dunod p. 863)

**BONUS si temps en plus :** Détente de Joule-Thomson ou Joule-Kelvin

### 6.2.3 Le réfrigérateur

A détailler (pomper le travail de Gey Lucas et Rossetti Sylvio)



## 7. Transitions de phase

## 8. Phénomènes de transport

## 9. Conversion de puissance électromécanique

## 10. Induction électromagnétique

## 11. Rétroaction et oscillations

## 12. Traitement d'un signal. Étude spectrale

# 13. Ondes progressives, ondes stationnaires

Niveau : CPGE (2ème année)

**Pré-requis :**

- Mécanique (1ère année)
- ?
- ?

**Bibliographie :**

- ?
- ?
- ?

**Commentaires du jury :**

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

**Expériences :** Mesure vitesse son

## Introduction

### 13.1 Généralités sur les ondes

#### 13.1.1 Description phénoménologiques

Def, exemples, def long, trans, tableau résumé, vitesse ?

#### 13.1.2 Dérivation de l'équation d'onde (D'Alembert)

Corde vibrante Rappels hypothèse avec ODG

Blabla sur les solutions

## 13.2 Ondes stationnaires

### 13.2.1 Hypothèses et dérivation

### 13.2.2 Exemple : la corde de Melde

## 13.3 Ondes progressives

### 13.3.1 Définition et dérivation

### 13.3.2 Solution générale

### 13.3.3 OPPH

Exp



## 14. Ondes acoustiques

## 15. Propagation guidée des ondes

## 16. Microscopies optiques

# 17. Interférences à deux ondes en optique

Niveau :

Pré-requis :

—  
—  
—

Bibliographie :

—  
—  
—

**Commentaires du jury :**

- 2016 : Les approximations mises en oeuvre dans les calculs de différence de marche doivent être justifiées a priori.
- 2015 : L'exposé doit permettre de préciser clairement les contraintes particulières que l'optique impose aux dispositifs interférentiels par rapport à d'autres domaines.
- 2014 : Un interféromètre comportant une lame séparatrice n'est pas obligatoirement utilisé en diviseur d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.

**Expériences :** Fentes d'Young (laser!!), mesure interférométrique et calcul largeur fente

## Introduction

### 17.1 Généralités sur les interférences à deux ondes

#### 17.1.1 Description

Dans la physique moderne et dans tout un tas d'autres domaines industriels, les phénomènes d'interférence, en particulier optique, jouent un rôle fondamental. Nous aurons l'occasion d'y revenir dans une partie ultérieure. Elles sont une très bonne illustration de la nature ondulatoire de la lumière. Commençons par donner une définition rigoureuse de ce qu'est une interférence.

**Def :** Phénomène par lequel la superposition de plusieurs ondes (électromagnétiques ici) produit localement une intensité qui est différente de la somme des intensités individuelles.

On sait tous ici que l'intensité lumineuse s'additionne, lorsqu'on allume deux lumières, l'intensité lumineuse sur une surface éclairée est deux fois plus importante. Néanmoins, sous certaines conditions très précises, dites de cohérence, les ondes électromagnétiques peuvent s'additionner ou s'annuler mutuellement et former ce que l'on appelle alors une figure d'interférence.

[SLIDE]

C'est ce que l'on va décrire ici.

### 17.1.2 Formalisme et expression mathématique

Rappel : Onde lumineuse peut être décrite grâce au champ électrique  $\vec{E}_1(M, t) = \vec{E}_{1,0} \cos(\omega_1 t - \varphi_1(M))$ . Dans le cas qui nous intéresse, on veut calculer l'intensité de deux ondes EM qui se superposent, que l'on notera  $\vec{E}_1$  et  $\vec{E}_2$  et dont l'intensité au point  $M$  vaut  $I(M) = \langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2 \rangle$ . Pourquoi on s'intéresse au carré, et pourquoi à l'intensité ? Parce que nos yeux, et les détecteurs que l'on utilise ne sont pas sensibles au champ directement mais à l'énergie du champ, l'énergie des photons, et donc à  $E^2$ . Maintenant pourquoi la moyenne ? Parce que dans la réalité les champs électriques dans le visible ont une période typique de  $10^{-14}$  s, ce qui est extrêmement faible au regard du temps de réponses de nos instruments, pour les yeux par exemple, le temps de réponse est de l'ordre de 0.1 s, photodiode  $10^{-6}$  s, ccd  $10^{-2}$ , donc bien plus grand que la période du champ. On va donc intégrer le champ  $E^2$  sur le temps de réponse pour avoir une moyenne.

écrire formule avec intégrale (de quoi tu parles ?)

faire le calcul général avec les cos (en réel donc)

aboutir à

$$E_1^2/2 + E_2^2/2 + \vec{E}_1 \vec{E}_2 \langle \cos((\omega_1 + \omega_2)t - (\varphi_1 + \varphi_2)) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1 - \varphi_2)) \rangle \quad (17.1)$$

On reconnaît  $I_1 + I_2$  + un terme dit *terme d'interférence* (expliquer pourquoi et conditions pour lesquels il s'annule). Le premier terme est assez facile à traiter car peu importe les conditions sur  $\omega_1$  ou  $\omega_2$ , ce terme va osciller donc sur un grand temps d'intégration, on va avoir ce terme qui s'annule. Ce qui est intéressant c'est le deuxième terme puisqu'il va nous permettre d'avoir un terme non-nul par intégration, et donc interférence, lorsque  $\omega_1 = \omega_2$ . On dit dans ce cas que les sources sont synchrones. On va tout de suite évacuer la question de la polarisation, en effet on va considérer que nos rayons sont suffisamment parallèles, en tout cas pas perp. auquel cas on aurait le produit scalaire nulle et donc pas de terme d'interférence. C'est ce qu'on appelle l'approximation scalaire. Et on a donc  $E_1 E_2$  (sans flèche). Le cas où est les ondes sont polarisés est hors programme.

Développer  $\varphi_1$  et  $\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} S_i M + \varphi_{i_s}$ .

Parler de comment est produite la lumière, désexcitation donc avec une phase aléatoire. Pour obtenir qu'ils soient identique, on peut par exemple utiliser une source primaire qu'on sépare en deux points -> Young comme on verra tout à l'heure. Dans ce cas, il nous restera plus que la différence de marche, différence des chemins optiques à calculer et on aura donc

$$I = I_1 + I_2 + \langle \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta\right) \rangle$$

avec  $\delta = S_2 M - S_1 M$ .

On peut finalement écrire  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \delta\right)$ .

On va s'intéresser à un cas concret où ça marche bien, c'est un peu le dispositif historique, celui des trous de Young.

## 17.2 Fentes de Young

### 17.2.1 Dispositif expérimental

Rappel sur le dispositif, donc une source monochromatique, comme un laser par exemple avec lequel on va venir éclairer deux trous.

Faire dessin.

Ce qu'on veut c'est calculer la différence de marche  $\delta = S_1M - S_2M$ .

Donc on écrit  $S_1, S_2, M$  puis les vecteurs...

Avant toute chose, comme on va réaliser quelques approximations, notons que  $D \gg y, x$  et  $D \gg a$ , en effet  $a$  et  $y$  seront de l'ordre du mm là où  $D$  sera de l'ordre du m.

Calcul complet pour aboutir à  $\delta = \frac{ax}{D}$ .

Réécrire  $I$  du coup.

Puisque les deux rayons ont la même intensité, on peut réduire  $I$  à la formule de Fresnel  $I = 2E_0(1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{ax}{D}))$ . On observe des franges d'interférence de manière périodique, on peut introduire un ordre d'interférence noté  $p = \frac{\delta}{\lambda_0}$ . Ce qui permet aussi de définir un contraste comme  $C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$  et qui vaut 1 dans un cas idéal. La distance entre deux franges, appelée interfrange et définie comme  $i = x_{p+1} - x_p$  vaut alors dans le cas des trous de Young  $i = \frac{\lambda_0 D}{a}$  (commenter formule et le fait qu'à partir de la mesure de l'interfrange on peut remonter à la longueur  $a$  entre les trous). C'est ce qu'on va faire ici comme expérience.

#### Expérience

Les équations qu'on a utilisées et l'expérience qu'on a réalisée sont valables dans le cas où nos deux fronts d'ondes sont dits cohérents et on va distinguer deux cohérences, la cohérence spatiale et temporelle, on va notamment exposer les limites de cette relation dans la réalité.

## 17.3 Limites réelle et notion de cohérence

[elearning]

### 17.3.1 Cohérence spatiale

### 17.3.2 Cohérence temporelle

# 18. Interférométrie à division d'amplitude

Niveau : CPGE (2ème année)

**Pré-requis :**

- Optique Géométrique
- Int. division front d'onde

**Bibliographie :**

- M.-N. Sanz, *Physique tout-en-un*, Dunod
- P. Olive, *Physique PC/PC\**, ellipses
- S. Houard, *Optique*, de Boeck
- J.-M. Brébec, *Opt. ondul.*, Hachette

**Commentaires du jury :**

- 2017 : Le candidat doit réfléchir aux conséquences du mode d'éclairage de l'interféromètre (source étendue, faisceau parallèle ou non...). Il est judicieux de ne pas se limiter à l'exemple de l'interféromètre de Michelson.
- 2016 : La distinction entre divisions du front d'onde et d'amplitude doit être précise. Le jury rappelle que l'utilisation d'une lame semi-réfléchissante ne conduit pas nécessairement à une division d'amplitude.
- 2015 : Les notions de cohérence doivent être présentées.
- 2014 : Un interféromètre comportant une lame séparatrice n'est pas obligatoirement utilisé en diviseur d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.

**Expériences :** Double raie du sodium avec Michelson

## Introduction

### 18.1 Intérêt de la division d'amplitude

#### 18.1.1 Division en front d'onde et division d'amplitude

Rappeler différences entre division du front d'onde et division d'amplitude, définition de division d'amplitude **ref?** + schéma général. Rappeler qu'on est en source ponctuelle monochromatique.

Rappeler résultats élémentaires sur l'intensité, le contraste etc. (cf. leçon précédente). Parler de cohérence temporelle (même pulsation, condition pour que terme d'interférence soit non-nul).

Finir sur le fait que le modèle de la source ponctuelle est un modèle et qu'il est limité et introduire subsection suivante en parlant des sources étendues.

### 18.1.2 Cohérence spatiale et source étendue

Calcul [vidéo e-learning physique](#) et brouillage

cf. conclusion [Marchetti](#)

### 18.1.3 Théorème de localisation

cf. [Marchetti](#)

## 18.2 L'interféromètre de Michelson

Pour cette section, ouvrir n'importe quel bouquin de la Biblio

### 18.2.1 Configuration en lame d'air

### 18.2.2 Configuration en coin d'air

### 18.2.3 Expérience

## 18.3 Applications de la division d'amplitude

### 18.3.1 Mesure de d'indice optique

### 18.3.2 Expérience LIGO-VIRGO

### 18.3.3 Spectroscopie (Fabry-Perrot)

Préciser que c'est du hors programme mais que c'est quand même intéressant. Présenter rapidement le dispositif et expliquer qualitativement (Houard). Présenter spectroscopie. Michelson typique limité car résolution de l'ordre de  $10^{-9}$ . FP de l'ordre de  $10^{-11}$  à  $10^{-13}$   
Houard p. 239.



## 19. Diffraction de Fraunhofer

## 20. Diffraction par des structures périodiques

## 21. Absorption et émission de la lumière

## 22. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

## 23. Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

## 24. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

## 25. Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités

# 26. Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley

Niveau : Licence

Pré-requis :

- Mécanique classique
- Electromagnétisme
- Interférences

Bibliographie :

- Blabla
- Blabla
- Blabla

## Introduction

L'expérience ou plutôt les expériences de Michelson et Morley (1881-1887) sont probablement parmi les expériences les plus marquantes et influentes de la physique moderne. En effet, la fin du XIX<sup>e</sup> siècle est marquée par une lourde contradiction entre la physique galiléo-newtonienne d'un côté, qui permet de décrire la cinématique et la dynamique des corps à différentes échelles, et de l'autre l'électromagnétisme qui permet d'expliquer tous les phénomènes liés, comme son nom l'indique, à l'électricité, au magnétisme mais également à la propagation des ondes lumineuses. Bien que très solides et bien établis ces deux domaines tels qu'ils étaient formulés à l'époque, entraient en fait en contradiction et ce sont les expériences de MM qui permirent l'émergence d'un dépassement de cette contradiction via la relativité restreinte dont la cinématique relativiste est un aspect. C'est ce qu'on se propose d'étudier dans cette leçon

## 26.1 Électromagnétisme et transformation des vitesses

Avant de plonger au coeur des contradictions, quelques rappels de physique galiléo-newton :

### 26.1.1 Référentiels en physique galiléo-newtonienne

On considère deux référentiels  $\mathcal{R}$  et  $\mathcal{R}'$  où  $\mathcal{R}'$  est en translation rectiligne uniforme par rapport à  $\mathcal{R}$ , tel que :

DESSIN

Dans ce cas, on peut exprimer les positions de l'un par rapport à l'autre tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{array} \right.$$



Il est évident que la physique doit être la même dans tous les référentiels. Dans le cadre de la physique newtonienne, de la dynamique, cela signifie que les forces s'expriment de la même manière dans tous les référentiels. Et c'est ce qu'on voit si on considère les transformations de Galilée :

$$\begin{aligned}
 F' &= ma' \\
 &= m \frac{d^2 x'}{dt^2} \\
 &= m \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} - v \right) \\
 &= m \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dt} \right) \\
 &= m \frac{d^2 x}{dt^2} = F \\
 \Rightarrow &\boxed{F' = ma' = ma = F}
 \end{aligned}$$

Notons que dans ce modèle, en mécanique classique, le temps est absolu, il est le même dans tous les référentiels, "s'écoule" de la même façon.

Après ces considérations, intéressons-nous à l'électromagnétisme et aux équations de Maxwell.

### 26.1.2 Equations de Maxwell et propagation des ondes EM

On considère les équations de Maxwell, que je projette ici puisqu'elles sont bien connues. Vous avez déjà vu en deuxième année, qu'à partir ces équations, il est possible de dériver une équations de propagation des ondes en prenant le rotationnel du rotationnel de  $\vec{E}$  par exemple, d'un côté on a :

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E} \\
 \text{De plus, } \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) &= -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \\
 &= -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \\
 \text{Ainsi, on a } \Delta \vec{E} &= \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \text{ où } c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}
 \end{aligned}$$

Même résultat pour le champ  $\vec{B}$ . Ici apparaît une constante, homogène à une vitesse  $c$ , qui se trouve être la vitesse de la lumière dans le vide et qu'on sait mesurer à 299 792 458 m/s.

Vous noterez que j'ai dit la vitesse de la lumière, sans préciser le référentiel. **discussion.**

On va faire un petit exo, que se passe-t-il si on applique les transformations de Galilée à Maxwell? D'abord, il faut savoir comment vont être modifiés les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$ . On considère toujours les mêmes référentiels en translation l'un par rapport à l'autre. On se rappelle que les forces  $F = F'$ , si on considère les forces de Lorentz, on doit avoir ... Considérons  $\vec{v}_q = v_q \vec{u}_x$ ,  $\vec{E} = E(x, t) \vec{e}_y$  et  $\vec{B} = B(x, t) \vec{e}_z$ , on montre alors que :

$$\begin{cases} E' = E - vB \\ B' = B \end{cases} \qquad \begin{cases} E = E' + vB' \\ B = B' \end{cases}$$

Maintenant, on va considérer la dernière équation de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (26.1)$$

qui ici devient :

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (26.2)$$

En appliquant les transformations de Galilée il vient :

[Développement] cf. <https://www.youtube.com/watch?v=P79Ur8LVcy8>

Et là, on a un problème. Parce que les équations de Maxwell dépendent du référentiel... il y a une infinité de manières non-équivalentes d'écrire les Eq. de Maxwell, ce qui n'est pas universel. 3 Hypothèses :

- Les équations de Maxwell sont fausses
- Il y a un référentiel de prédilection et les eq. de Maxwell doivent être modifiées
- Les transformations de Galilée sont fausses, ou limitées

Le souci c'est que toutes ces affaires marchent quand même vachement bien. C'est l'expérience de Michelson et Morley qui a permis de trancher la question.

### 26.1.3 Expérience de Michelson et Morley

On a introduit l'éther (expliquer le concept chelou). Et Michelson et Morley ont voulu montrer l'existence de l'éther

**expliquer exp, slide de l'expérience que l'on reproduit au tab.**

Un aller et retour dans le sens de la marche de la Terre (vers M1) nécessite un temps

$$t_1 = \frac{D}{c-v} + \frac{D}{c+v} = \frac{2D \cdot c}{c^2 - v^2} = \frac{2D}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

et un aller-retour perpendiculairement à la marche de la Terre (vers M2) nécessite un temps

$$t_2 = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad \text{soit, en négligeant les termes de second ordre : } \frac{2D}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} \right).$$

La différence de temps de parcours entre les deux trajets est alors :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{Dv^2}{c^3}.$$

Trop petit à mesurer mais interférence visible :

$$\Delta p = \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \cdot \Delta t}{\lambda} = \frac{D}{\lambda} \beta^2 \approx 0.2 \text{ franges} \quad (26.3)$$

Observent rien -> conclusion  $c$  même dans tous les référentiels, pas d'éther, nouvelles transfo nécessaires

## 26.2 Émergence de la relativité restreinte

### 26.2.1 Postulats et transformations de Lorentz

- Tous les référentiels sont équivalents

— Vitesse de la lumière est égale dans tous les réf et vaut 299 752 458 m/s

$$\begin{cases} ct' = \gamma(ct - \beta x) \\ x' = \gamma(x - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad \begin{cases} ct = \gamma(ct' + \beta x') \\ x = \gamma(x' + \beta ct') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

Ici on le voit, le temps n'est plus absolu mais est transformé également. Les champs électriques et magnétiques deviennent :

$$\begin{cases} E'_y = \gamma(E_y - vB_z) \\ B'_z = \gamma\left(B_z - \frac{vE_y}{c^2}\right) \end{cases} \quad \begin{cases} E_y = \gamma(E'_y + vB'_z) \\ B_z = \gamma\left(B'_z + \frac{vE'_y}{c^2}\right) \end{cases}$$

Et là, on peut montrer que les éq. de Maxwell sont biens invariantes par changemenet de référentiel

### 26.2.2 Conséquences

Poly de LLG

### 26.2.3 Expérience des muons

Dilatation du temps a conséquences dans le reel : exemple avec les muons. Produits par l'interaction entre les rayonnements cosmiques qui entrent dans l'atmosphère et créé des muons. ils ne devraient pas être observables au sol (50 km) mais ils le sont.

$$\Delta t = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$v = 99.995c$$

$$\gamma = 100$$

$$600 \text{ m } 60 \text{ km}$$

Concorde voyage à 1500 km/h, Hafele et Keating 3h de vol -> l'horloge placée dans l'avion accuse un léger retard de 0.01 microseconde

## 27. Effet tunnel : application à la radio-activité alpha