

# LP1: Gravitation

jeudi 20 mars 2025 09:07

Niveau L2: géo

Pendule  
Chute libre



gravitation

GRAVITATION	
18 janvier 2025 Grégory SETNIKAR & Valentin MOUET	Correcteur C.Eloy (camille.elay@ens-lyon.fr) et F.Rondeau (francois.rondeau@ens-lyon.fr)
Niveau : L2	
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"><li>&gt; Mécanique du point</li><li>&gt; Électrostatique</li><li>&gt; Théorème de Gauss</li></ul>	
Expériences	
<ul style="list-style-type: none"><li>■ Mesure de <math>g</math> avec un ressort ou un pendule</li><li>■ Mesure de <math>g</math> avec un accéléromètre</li></ul>	
Bibliographie	
<ul style="list-style-type: none"><li>⚡ Dictionnaire de Physique, Taillet</li><li>⚡ 51 Leçons de l'agrégation externe de sciences physiques, Thierry Meyer</li><li>⚡ Physique pour l'agrégation, Roussille</li><li>⚡ Mécanique, Pérez</li><li>⚡ Géophysique, Dubois</li><li>⚡ Mini manuel de Géologie Géophysique, Langlois</li><li>⚡ Comment connaître la valeur de <math>g</math> en France. Mesure du champ de pesanteur terrestre, Michel DIAMENT, Technique de l'ingénieur 10 Juin 2005</li></ul>	
Table des matières	
0 Introduction	2
1 Gravitation : quelques généralités	2
1.1 Loi de la gravitation universelle	2
1.2 Le champ gravitationnel	3
1.2.1 Analogie électrostatique	3
1.2.2 Application du théorème de Gauss en gravitation	3
2 Gravitation à l'échelle terrestre	4
2.1 Expression de $g$	4
2.2 Mesure expérimentale de $g$	5
2.2.1 Méthode du pendule simple	5
2.2.2 Gravimétrie	6
2.3 Vitesse d'évasion	6
3 Gravitation et étude des trajectoires	6
3.1 Étude qualitative du mouvement	6
3.2 Équation de la trajectoire	7
3.3 Caractéristiques du mouvement et lois de Kepler	7
3.4 Ouverture sur la relativité générale	9

Étayer la partie gravitation terrestre et suppr la partie 3

## 0 Introduction

La gravitation est l'une des quatre forces fondamentales de la nature. Introduite par Newton en 1687, sa loi universelle a permis d'unifier la physique terrestre et céleste. Cette force joue un rôle clé dans des domaines variés : de la chute libre des corps aux trajectoires des planètes, en passant par la mesure locale du champ gravitationnel, ou encore l'exploration spatiale.

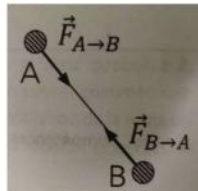
**Objectifs :** Comment décrire la gravitation ? Et comment à partir de cette description pouvons nous arriver à des applications concrètes ?

## 1 Gravitation : quelques généralités

### 1.1 Loi de la gravitation universelle

La loi de Newton s'écrit :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}, \quad (1)$$

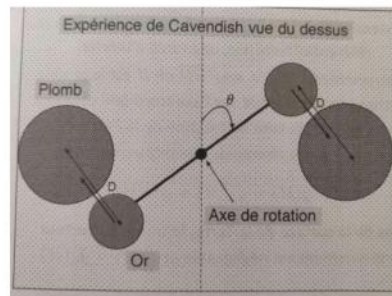


- Dirigée selon la ligne qui lie les deux masses
- Proportionnelle aux masses des corps et inversement proportionnelle au carré de leur distance
- Force **toujours** attractive
- Portée **infinie**

avec  $G$  la constante de gravitation universelle ( $G = 6,67408 \pm 0.00031) \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$ ).

La valeur de la constante gravitationnelle peut être déterminée expérimentalement (expérience du pendule de Cavendish en 1799).

Cavendish utilise un pendule de torsion formé d'une tige rigide et de deux boules métalliques en or de même masse  $m = 750\text{g}$  et de forte densité (19,3).



On approche alors de ces boules en or, deux grosses masses attractives :  $M = 160\text{kg}$  en plomb et de densité 11,4. L'attraction gravitationnelle entre les boules d'or et celles de plomb engendre alors un couple qui fait tourner le pendule de torsion d'un angle  $\theta$ . En accrochant un miroir sur la tige et en l'éclairant, le faisceau tourne d'un angle  $2\theta$ .

On utilise ensuite une lunette de visée pour repérer ce faible angle de rotation. Il convient de remarquer que la force de gravitation responsable du couple de torsion est infime, de l'ordre du dixième de  $\mu\text{N}$  !

La taille de la tige est de 2 mètres ce qui donne un bras de levier de la force de gravitation de 1 mètre. Appelons  $D$  la distance entre les centres des boules et  $L$  le bras de levier.

Le couple des forces de gravitation exercé sur l'axe du fil de torsion vaut :

$$\vec{M}_{\text{grav}/\Delta} = 2 \frac{GMmL}{D^2} \Rightarrow -C\theta + 2 \frac{GMmL}{D^2} = 0 \quad (2)$$

$$G = \frac{C\theta}{2MmL} D^2 \quad (3)$$

La mesure de l'époque donne :  $G = 6,754 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$  ce qui est remarquablement proche de la valeur admise (par le CODATA<sup>1</sup>) depuis 2014 de  $(G = 6,67408 \pm 0.00031) \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ .

## 1.2 Le champ gravitationnel

### 1.2.1 Analogie électrostatique

On a vu en électrostatique :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B}^{\text{el}} = \frac{-q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} = q \vec{E} \quad (4)$$

Et on vient de voir :

$$\vec{F}_{A \rightarrow B}^{\text{grav}} = \frac{-Gm_1 m_2}{r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B} = m_1 \vec{G} \quad (5)$$

On peut donc extraire un champ gravitationnel, grandeur vectorielle locale, défini comme :

$$\vec{G} = -G \frac{m_B}{r^2} \vec{u}_{A \rightarrow B}, \quad (6)$$

où  $m_B$  est la masse source et  $r$  la distance au centre de celle-ci.

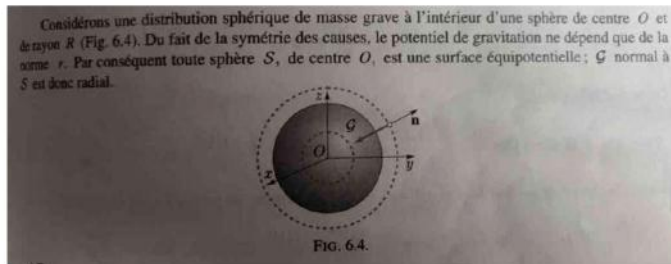
On a donc vu qu'il existe une forte ressemblance entre les deux forces mais l'analogie ne s'arrête pas là :

	Gravitation	Électrostatique
Force	$\vec{F}_g = -G \frac{m_A m_B}{\ \vec{r}_B - \vec{r}_A\ ^2} \vec{u}$	$\vec{F}_{el} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$
Charge	$m_A$	$q$
Champ	$-G \frac{m_2}{r^2}$	$\frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
Théorème de Gauss	$\iint \vec{G} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}}$	$\iint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$
Caractère de la force	Attractif	Attractif ou répulsif $\Rightarrow$ Écrantage

Cependant, la gravitation est uniquement attractive, contrairement à l'électrostatique (ce qui explique qu'on ne puisse pas écranter la force gravitationnelle).

### 1.2.2 Application du théorème de Gauss en gravitation

Exercice : champ produit par une distribution sphérique de masse :



<sup>1</sup> i. comité de données par la science et la technologie

Cas  $r > R$  :

$$\vec{G}(r) = \frac{-GM_{tot}}{r^2} \vec{u}_r \quad (7)$$

Cas  $r < R$  :

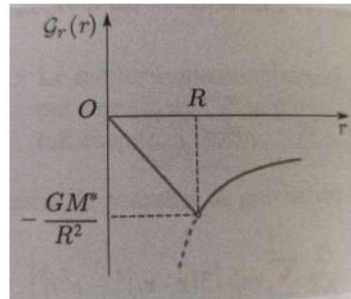
$$\vec{G}(r) = \frac{-GM_{in}}{r^2} \vec{u}_r \quad (8)$$

Or si la distribution est homogène, on a :

$$G_r(r) = -\frac{G}{r^2} \rho \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{-GM_{tot}r}{R^3} \quad (9)$$

D'où :

$$\vec{G}(r) = \frac{-GM_{tot}r}{R^3} \vec{u}_r \quad (10)$$



On remarque qu'en dehors de la sphère chargée, on retrouve la force en  $1/r^2$ , on est donc bien consistant.

## 2 Gravitation à l'échelle terrestre

### 2.1 Expression de $g$

Si on oublie l'aspect vectoriel, le champ gravitationnel à proximité de la surface de la Terre s'écrit avec  $h$  l'altitude sur Terre :

$$g(h) = G \frac{M}{(R+h)^2} \quad (11)$$

où  $M$  est la masse de la Terre au niveau du point de mesure et  $r$  la distance entre le centre de la Terre et l'objet. À proximité de la surface terrestre,  $r = R + h$ , avec  $R$  le rayon de la Terre et  $h$  l'altitude de l'objet.

Pour  $h \ll R$ , on peut effectuer un développement limité de  $g(h)$  autour de  $h = 0$ . En utilisant  $(1+x)^{-2} \approx 1 - 2x$  pour  $x \ll 1$ , on a :

$$g(h) = G \frac{M}{R^2} \left(1 - \frac{2h}{R}\right), \quad (12)$$

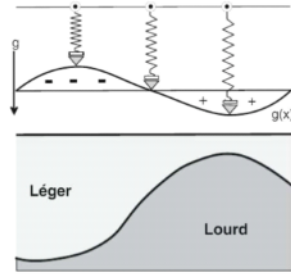
$$g(h) \approx g_0 \left(1 - \frac{2h}{R}\right), \quad \text{avec } g_0 = G \frac{M}{R^2}. \quad (13)$$

Avec une masse terrestre de  $M = 5.97210^{24} \text{ kg}$  et  $R = 6378137 \text{ m}$  on trouve  $g_0 = 9.79169 \text{ m.s}^{-2}$  ou  $g_0 = 979 \text{ Gal}$ .

On voit directement que l'on a une correction en fonction de l'altitude  $h$ , où l'on note que la pesanteur est de moins en moins forte en montant (ce qui est logique et attendu).

Pour se donner une idée ordg : Si on est à 2000m d'altitude  $g = 9.79169 \cdot (1 - (4000/6\,378\,137)) = 9.78555 \text{ m.s}^{-2}$ . On a une variation de l'ordre de  $62.8 \mu\text{Gal}$  (0.6%) !

Avec les mains, on voit également une dépendance en  $M$ . Vu notre taille par rapport à la Terre, on peut se convaincre qu'on a pas l'intégralité de la masse de la Terre sous les pieds. On peut montrer (via le théorème de Gauss pour un cylindre à la surface de la terre) qu'il existe une correction qui dépend de l'écart local de masse « sous » le point que l'on considère.



En terme d'ordre de grandeur ces corrections sont très petites, par exemple pour une nappe phréatique de 10 mètres de hauteur, provoque une anomalie de l'ordre de 1mGal (la masse volumique de l'eau est de  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$  à comparer à la densité moyenne de la croûte terrestre qui est de  $2900 \text{ kg.m}^{-3}$ ).

On voit en terme d'ordre de grandeur que ce sont des anomalies plus grandes que celles dues à l'altitude, et qui, on le verra sont plus simples à détecter en pratique.

## 2.2 Mesure expérimentale de $g$

Avant de s'intéresser à ces corrections, comment est-ce qu'on mesure ce  $g$  ?

### 2.2.1 Méthode du pendule simple

Historiquement, on a commencé par utiliser des pendules. Vous avez vu l'équation d'un pendule l'année dernière, et ce qui vous intéressez à l'époque, c'était surtout de résoudre l'équation différentielle, de voir que les lois de la mécanique étaient bien vérifiées etc, mais si vous vous souvenez, la fréquence d'oscillation d'un pendule est directement proportionnelle à  $g$ , et c'est un excellent moyen pour le mesurer !

Rappel : la période d'oscillation d'un pendule simple est donnée par :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad \text{soit } T^2 = \frac{4\pi^2\ell}{g}. \quad (14)$$

Valeur attendu à Lyon : 9.8059 Source : Bureau Gravimétrique International (BGI) <sup>ii</sup>

**Expérience :**

- Matériel : fil, masse suspendue, aimant, règle, bobine de fluxmètre, oscilloscope.
- Procédure : mesurer la longueur  $\ell$  du pendule et le temps  $T$  pour plusieurs oscillations directement à l'oscillo. (l'aimant qui bouge devant la bobine de fluxmètre, induit un courant par la loi de Lenz qu'on détecte à l'oscillo)
- Calcul : déduire  $g$  avec propagation des incertitudes.

ii. <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/gravity-databases/absolute-gravity-data/#/>

### 2.2.2 Gravimétrie

Jusque dans les années 50, on utilisait des méthodes à bases de pendules comme je l'ai présenté, mais de plus en plus sophistiqué pour connaître plus précisément les erreurs commises. Aujourd'hui, il existe principalement deux types de dispositif pour mesurer  $g$  :

- Gravimètre absolu : très précis, mais pas portable, mesure des différences de l'ordre de la dizaine de  $nGal$ ! (dispositif supra)
- Gravimètre relatif : moins précis, mais plus portable, on va utiliser des systèmes avec des ressorts, un peu comme des accéléromètres finalement, avec des mesures de corrections de l'ordre du  $\mu Gal$  voir de la dizaine de  $\mu Gal$

Exemple de gravimètre relatif : mon portable avec phyphox.

Ajout discussion avec jury : Gravimètre à atome froid <https://syrtel.obspm.fr/spip/science/iaci/projets-en-cours/gravimetre/article/gravimetre-a-atomes-froids>

**Application** : Anyway, des mesures aux  $\mu Gal$  pour détecter des variations du  $mGal$  pour détecter une nappe phréatique par exemple, c'est largement suffisant. Donc on va avoir tout ce qui est étude des sols. Les relevés plus précis, servent à des fins plus de veilles scientifiques (études des mouvements tectoniques, ou géologie des glaces etc.).

### 2.3 Vitesse d'évasion

Une dernière « propriété » de la gravitation à une échelle « locale » est la notion de vitesse d'évasion. C'est-à-dire à partir de quelle vitesse un corps est capable de se soustraire au champ de gravitation terrestre, et peut quitter la Terre.

Si l'on reprend l'expression de la force gravitationnelle, on a :

$$F = \frac{GMm}{R^2} \quad (15)$$

Si l'on s'intéresse au travail de cette force pour la masse  $m$ , nécessaire pour déplacer le corps de la surface de la terre, à l'infini (donc en dehors de l'attraction Terrestre), on écrit :

$$W = \int_R^\infty F dr = \int_R^\infty \frac{GMm}{r^2} dr = \frac{GMm}{R^2} \quad (16)$$

Donc en partant du sol, l'énergie cinétique qu'il faudrait serait :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = W \quad (17)$$

Soit une vitesse minimale pour échapper à l'attraction terrestre de :

$$v_{\text{évasion}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}. \quad (18)$$

## 3 Gravitation et étude des trajectoires

On s'est intéressé aux propriétés globales de la force de gravitation, et ces conséquences à l'échelle de la Terre en termes de champ de gravitation, mais on ne s'est pas du tout intéressé pour le moment à l'essence même de cette théorie qui est l'étude du mouvement des corps, et en particulier, des corps célestes.

### 3.1 Étude qualitative du mouvement

- Techniquement, les deux corps se meuvent. Faisons cependant un calcul d'ordre de grandeur :  $M_{\text{Soleil}} = 2.10^{30} kg$  et  $M_{\text{Terre}} = 6.10^{24} kg$ , donc on peut considérer le Soleil fixe lors de l'étude du mouvement de la Terre. De même, on peut considérer la Terre fixe lors de l'étude du mouvement d'un satellite (d'une tonne environ).
- Système masse ponctuelle  $m$  dans le champ gravitationnel de  $M$  à symétrie sphérique placé à l'origine. Force :  $\vec{F} = \frac{-GMm}{r^2} \vec{u}_r$
- Conservation du moment cinétique :  $\vec{M}_O(\vec{F}) = \vec{OM} \times \vec{F} = \vec{0}$  donc par le théorème du moment cinétique  $\vec{L}_O(M) = m r^2 \dot{\theta} \vec{u}_\theta = c s t$ , ce qui nous amène à la loi des aires + mouvement plan
- Loi des aires : la vitesse areolaire est constante : c'est la seconde loi de Kepler! (animation python Loi de Kepler)

P24 géophysique dubois.

Y'a une partie sur les gravimètres à chutes libres qu'on peut mettre là

Attention deux types de relatifs:

les embarqués

Les fixes mais qui comparent à un point absolu

(gravimètre à ressort p28)

Cas de la mesure en mouvement pour scanner des surfaces (précisions  $1mGal$  (contre  $1nGal$  pour supra))

faut tenir compte de l'accélération, on fait du filtrage.

P34

P57 Anomalie de bouger

### 3.2 Équation de la trajectoire

On part du principe fondamental de la dynamique :

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{-k}{r^2} \vec{u}_r \quad (19)$$

où  $k = GmM$

On a vu que le mouvement est plan, donc en coordonnées polaires :

$$\begin{cases} m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = \frac{-k}{r^2} \\ m(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) = \frac{m}{r} \frac{d(r^2\dot{\theta})}{dt} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

La seconde équation n'est rien d'autre que la conservation de la quantité  $C = r^2\dot{\theta}$ , en revanche la première est l'équation du mouvement qui nous intéresse, pour la résoudre, on introduit le vecteur de Runge-Lenz :

Définition du vecteur le Runge-Lenz :

$$\vec{A} = \vec{v} \times \vec{L}_O - k\vec{u}_r \quad (21)$$

On peut montrer que le vecteur de Runge-Lenz est une constante du mouvement :

$$\frac{d\vec{A}}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} \times \vec{L}_O - k \frac{d\vec{u}_r}{dt} \quad (22)$$

$$= -\frac{k}{mr^2} \vec{u}_r \times mr^2\dot{\theta}\vec{u}_z - k\dot{\theta}\vec{u}_\theta \quad (23)$$

$$= \vec{0} \quad (24)$$

On a donc identifié une nouvelle intégrale du mouvement ! (après  $E_m$  et  $\vec{L}_O$ )

Il est finalement possible d'obtenir l'équation de la trajectoire en écrivant :

$$\vec{A} \cdot \vec{u}_r = (\vec{v} \times \vec{L}_O) \cdot \vec{u}_r - k \quad (25)$$

$$= (\vec{u}_r \times \vec{v}) \cdot \vec{L}_O - k \quad (26)$$

$$= \frac{\vec{L}_O^2}{mr} - k \quad (27)$$

$$= \frac{mC^2}{r} - k \quad (28)$$

En choisissant l'axe (Ox) comme étant orienté par  $\vec{A}$  (ce qui est possible car  $\vec{A}$  est constant) et en notant  $\theta$  l'angle entre  $\vec{u}_r$  et  $\vec{u}_x$ , on a  $\vec{A} \cdot \vec{u}_r = A \cos \theta$ , il vient :

$$A \cos \theta = \frac{mC^2}{r} - k \quad (29)$$

puis :

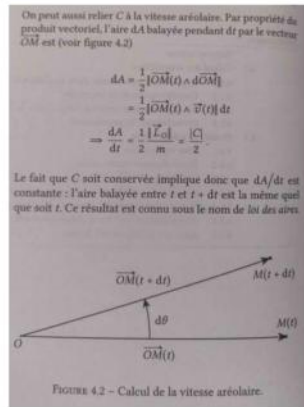
$$r = \frac{\frac{mC^2}{k}}{\left(1 + \frac{A \cos(\theta)}{k}\right)} \quad (30)$$

### 3.3 Caractéristiques du mouvement et lois de Kepler

On peut réécrire l'équation précédente comme :

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta} \quad (31)$$

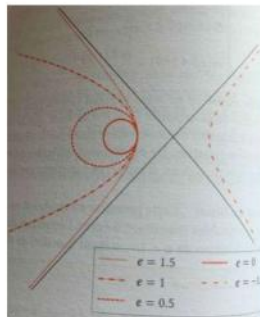
Avec  $p = \frac{mC^2}{k}$  et  $e = \frac{A}{k}$  (et toujours  $k = GmM$ ). Cette équation est l'équation d'une conique en coordonnées polaires. On remarque que dans notre cas,  $p$  et  $e$  sont positifs.



Une telle trajectoire est représentée par des formes géométriques distinctes selon les valeurs de  $e$  et de  $p$ . Tout d'abord, si  $p$  est positif, les trajectoires sont les suivantes :

- $e = 0$  : trajectoire circulaire de rayon  $p$ ,
- $0 < e < 1$  : trajectoire elliptique, dont l'origine  $O$  est un foyer, de demi-grand axe  $a = p/(1 - e^2)$  et de demi-petit axe  $b = \sqrt{ap}$ ,
- $e = 1$  : trajectoire parabolique,
- $e > 1$  : trajectoire hyperbolique.

Dans le cas où  $p$  est négatif, nous verrons à l'équation (4.5) que le seul cas d'intérêt sera  $e < -1$ , pour lequel la trajectoire est également hyperbolique. Toutes ces trajectoires sont représentées sur la figure 4.6. On donne dans la suite les relations qui existent entre les paramètres mathématiques  $e$  et  $p$  des trajectoires et les paramètres physiques  $E_m$ ,  $L_O$  et  $A$ .



La première Loi de Kepler énonce que les trajectoires des planètes autour du soleil sont des ellipses dont l'un des deux foyers est occupé par le Soleil. Si on fait un calcul d'ordre de grandeur, on trouve que  $e = 0,016$  pour la Terre, donc est bien dans le cas de la 1ère loi de Kepler !

Enfin, l'aire de l'ellipse est donc par définition  $\pi ab$  or, on peut calculer cette aire différemment :

En prenant, l'aire pour un « tour entier » donc sur un temps  $dt = T$ , on trouve :

$$A = \frac{CT}{2} = \pi ab \quad (32)$$

$$\frac{CT}{2} = \pi a \sqrt{ap} \quad (33)$$

$$\frac{T^2}{a^3} = 4\pi^2 \frac{p}{C^2} \quad (34)$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (35)$$

Car  $p = \frac{mC^2}{GmM}$

C'est la troisième loi de Képler !!



### 3.4 Ouverture sur la relativité générale

On a vu jusqu'ici, que la gravitation est une force instantanée à portée infinie. Vous verrez que ces hypothèses ne colle pas avec le principe de localité (rien ne va plus vite que  $c$ ) qui est la base de la relativité, et qui a donc perturbé Einstein et d'autres en son temps. Cela a conduit à la création d'une nouvelle théorie de la gravitation qu'est la relativité générale, et qui a permis (entre autre), d'expliquer des phénomènes comme l'avancée du périhélie de Mercure ou les ondes gravitationnelles qui ont été récemment observée.

#### Conclusion

À retenir :

- Gravitation selon Newton :  $F = mMG/r^2$
- Analogie avec l'électrostatique : force seulement attractive donc pas d'écrantage, mais application du théorème de Gauss possible
- À l'échelle terrestre, il existe plein de correction de  $g$ , utile pour mesurer tout un tas de choses.
- Gravitation = Force centrale = trajectoire fermée = lois de Képler

#### Remarques de l'auteur

Globalement le plan était trop ambitieux, même sans mes erreurs et pertes de temps, je pense que je ne serais pas aller au bout, et après discussion avec le jury la partie force centrale n'est pas forcément si pertinente. Elle est intéressante, mais il faut faire des choix, et vu le plan que je propose ici, accentuer le côté géophysique en rentrant plus dans les détails des anomalies de  $g$  semble être une bonne idée.  
Conseil de référence de la part du jury : "Geodesy" (il ne souvenait plus du nom de l'auteur).

## Questions/Remarques

Questions Grégory:

Reprise de la démonstration. J'avais pris comme surface  $\frac{4\pi}{3}R^3$  mais c'est le volume.

$$r < R \quad \oint \vec{G} \cdot d\vec{S} = -4\pi g M_{int}$$

$$4\pi G r^2 = -4\pi g M_{int} = -4\pi g \rho \frac{4\pi}{3} r^3$$

$$\boxed{G = -\frac{g \rho r}{3}}$$

$$r > R \quad 4\pi G r^2 = -4\pi g M_T \Rightarrow \boxed{G = -\frac{g M_T}{r^2}}$$

Tu passes de  $\vec{G}$  à  $G$ . Pourquoi? Pourquoi on peut le sortir de l'intégrale? Symétrie sphérique  $\vec{G} = G(r) \vec{e}_r$ , donc cste sur la surface.

Choix du niveau? Dans les rapports de jury, on dit qu'il ne faut pas faire une leçon force centrale. Mais Gauss c'est L2. Pourquoi mettre les trajectoires à la fin? Important, pour faire un lien entre méca terrestre/céleste.

Dans l'intro, vous parlez d'unification des deux mécaniques terrestres/célestes. Il y avait deux descriptions? Bonne question. Théorie des cycloïdes: on regardait les trajectoires des étoiles dans le ciel.

ça dépend si on met la terre au centre ou pas. Pour la gravitation en temps que telle, je ne crois pas, finalement.

La gravité est de portée  $\infty$  dans la description Newtonienne. Oui mais pas en relativité. La portée peut être  $\infty$  mais avec une vitesse finie donc c'est pas le problème. Le problème c'est l'instantanéité. C'est ce qui est réglé dans relativité G.

Vous avez défini l'interaction avec des sphères. C'est quasi le point d'application? Le centre de masse des sphères.

C'est quoi la valeur de G? J'avais oublié le  $10^{-11}$  au tableau.

Sur Cavendish, ordre de grandeurs des masses dans l'expérience? Masses en Pb: 160 kg chacune / Or: 750g.  
Écart angulaire? Force  $\mu N$ , je ne sais pas l'incertitude? Méthode de mesure de l'angle + couple de torsion.  
Sources lumineuses à l'époque? Je sais pas.

Forces échantées, développe. Force attractive uniquement ici. Pas d'échantage.  
La force ressentie par une charge est la somme des forces et il peut

y avoir des compensation dans l'électrostatique.

Comparer les ordres de grandeurs des forces électrostatiques et gravitationnelles. Electrostatique beaucoup plus intense.

Comment définir le champ gravitationnel pour une distribution de masse quelconque?

Comprend pas. Comment décrire la distribution de masse? de charge? Ingrédients importants? Forme intégrale avec  $g/r^2$ . C'est quoi  $g$ ? ...

C'est quoi la direction des poids? Vers le centre de la terre?  $\vec{G}$  c'est le champ de pesanteur terrestre, pas le poids. GG à 2km, ça vérifie les conditions du DL? Oui car  $\ll 6400\text{km} = R_{\oplus}$ .

Mesures relative/absolue. Comment on peut faire une mesure relative? Dans l'idée on connaît  $G$  à un endroit et on fait une mesure avec ressort / accéléromètre.

Discuter la notion de géoïde? cf schéma. Pour la Terre, valeur  $G$  constante. On suppose que la Terre est sphérique. Équipotentielle, pour la Terre c'est pas une sphère.

On calcule  $\vec{G}$  avec Gauss en dehors de la Terre, on a la droite. En un point donné, on ne ressent pas la même force, pourquoi? Il y a la densité. On a supposé que la densité était homogène. Reprene l'explication avec le cylindre. Le qui est à droite et à gauche n'influence pas? Discussion mais ça n'aboutit pas... C'est une question de densité. Beaucoup de connexions.

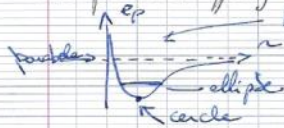
Sur le code, la régression est faite sans le nouveau est point... Qui? C'est quasi le z-score? Écart  $\sigma$  relatif. Valide la valeur obtenue par rapport à la valeur théorique.  $\chi^2$  quantifie la qualité du fit.  $z\text{-score} = 1$ , c'est mauvais? Non, on est à 1.5 de la valeur attendue. Si on avait obtenu 20, ça aurait été génial.

Runge-Lenz? Comment on le trouve? Historiquement, pas trivial mais cherché pour avoir des ellipses. Vecteur de Runge-Lenz à partir du APD? On fait  $\vec{PFD} \wedge \vec{L}$  en tenant compte du fait que  $\vec{L}$  est constant.

Tu peux interpréter le type de conique à partir de l'énergie? Potentiel effectif?



On peut avoir : sphères, ellipses, hyperboles, parabole, en fonction du paramètre  $e$ .  
Trajectoires liées et liées, par rapport au potentiel effectif ?



Je comptais faire le détail du calcul puis redémontrer les lois de Kepler pour les trajectoires fermées. Je voulais pas faire un LP force centrale.

Limites analogie électrostatique ? Il faut  $B$  mul. Plus récemment, on peut linéariser... compliqué.

Je vois pas. Différence : attractive ou répulsive. Force de Gravitation ? On ne peut pas calculer la trajectoire de Mercure avec la force de Newton. D'autres échelles où la théorie de Newton n'est pas compatible avec les observations ? Comète des rotation des galaxies. Matière noire. Peut être qu'avec cette masse on plus je crois que le cadre Newtonien reste valable.

Bien  
Calculs et gestion du temps  
Tableau OK mais des choses dits à l'oral mais pas écrites  
Être plus formel le jour J.

Plan : je comprends l'idée L2 mais  
je serais allé plus loin et j'aurais  
enlevé la partie III.  
→ on aurait pu aller dans la  
partie géophysique.  
→ on aurait pu discuter pourquoi  
ça ressemble un effet inertielle  
on aurait pu parler des effets  
de marées, gravitation différentielle  
→ penser l'hydrologie avec distribution  
de masse (?) quelconque.

Prérequis : induction, loi de Lenz.

Intro TB jusqu'à la démo  
puis la fin.

Est-ce que c'est pas plus sûr de  
mettre la manipe à la fin ? Non...  
car c'était imposé.

La manipe a fait travailler la suite  
mais le reste était clair.

Faire des notes claires pour ne pas  
hésiter sur les calculs → tout noter.  
sur les calculs.

⚠ à attitude " dans tous les cas vous allez poser la question "...

Range de précision au début (pt d'application de la force).

Sur la manip : pourquoi pas un pendule pesant ? Approximations ? Mouvement plan, torsion du fil. Être prêt sur les questions dissipation due à l'aimant.

Re/ pour gravimétrie ?  
 { Dumas, géophysique  
 Cours de géophysique.

⚠ à bien utiliser le point dans la manip.

⚠ score valide pas la régression  
 c'est le  $\chi^2$ .

Gravimètres absolus transportables à atomes froids (déformation du nuage de Rb pour avoir  $g$ ).

Sur la gravimétrie, le bonhomme sent la gravitation de toute la masse mais c'est l'inhomogénéité qui crée l'anomalie.

Cyclades : Epicycles pour type Mercure par exemple.



Avant Newton, il ne devait y avoir que Galilée et Kepler. RG n'est pas suffisante pour la trajectoire de Mercure.  
↳ battez-vous !

Motivations pour la RG : dans RR il y a encore un référentiel privilégié. On voulait une théorie valable partout référentiel.

Pour une distribution de masse quelconque on fait un développement multipolaire.

Diapo

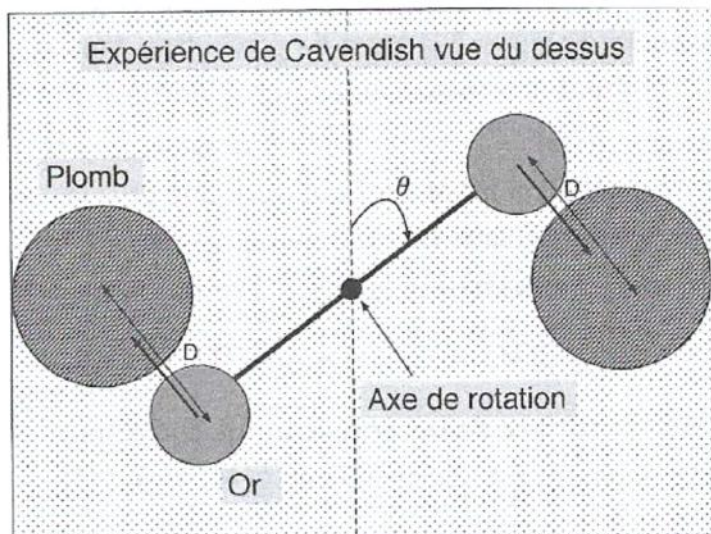
# Gravitation

Élément imposé : Mettre en œuvre une mesure expérimentale du champ gravitationnel à la surface de la Terre.



Mardi 07 Janvier 2025

## Expérience de Cavendish





## Analogie : gravitation / électrostatique



	Gravitation	Électrostatique
Force	$\vec{F}_g = -G \frac{m_A m_B}{\ \vec{r}_B - \vec{r}_A\ ^2} \vec{u}$	$\vec{F}_{el} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$
Charge	$m_A$	$q_1$
Champ	$-G \frac{m_B}{r^2}$	$\frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
Théorème de Gauss	$\iint \vec{G} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{\text{int}}$	$\iint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$
Caractère de la force	Attractif	Attractif ou répulsif $\Rightarrow$ Écrantage

## Analogie : gravitation / électrostatique



	Gravitation	Électrostatique
Force	$\vec{F}_g = -G \frac{m_A m_B}{\ \vec{r}_B - \vec{r}_A\ ^2} \vec{u}$	$\vec{F}_{el} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}$
Charge	$m_A$	$q_1$
Champ	$-G \frac{m_B}{r^2}$	$\frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$
Théorème de Gauss	$\iint \vec{G} \cdot d\vec{S} = -4\pi G M_{int}$	$\iint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0}$
Caractère de la force	Attractif	Attractif ou répulsif $\Rightarrow$ Écrantage

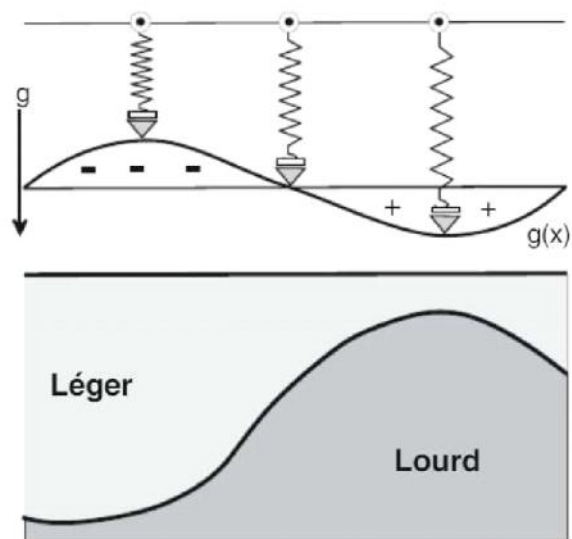
### Limite

L'analogie est valide qu'avec l'électrostatique ! (pas de champ magnétique)

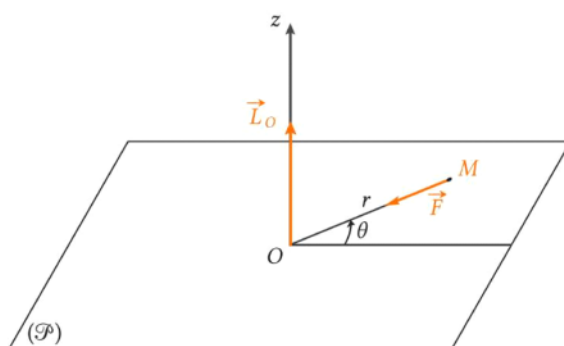




## Anomalie de g



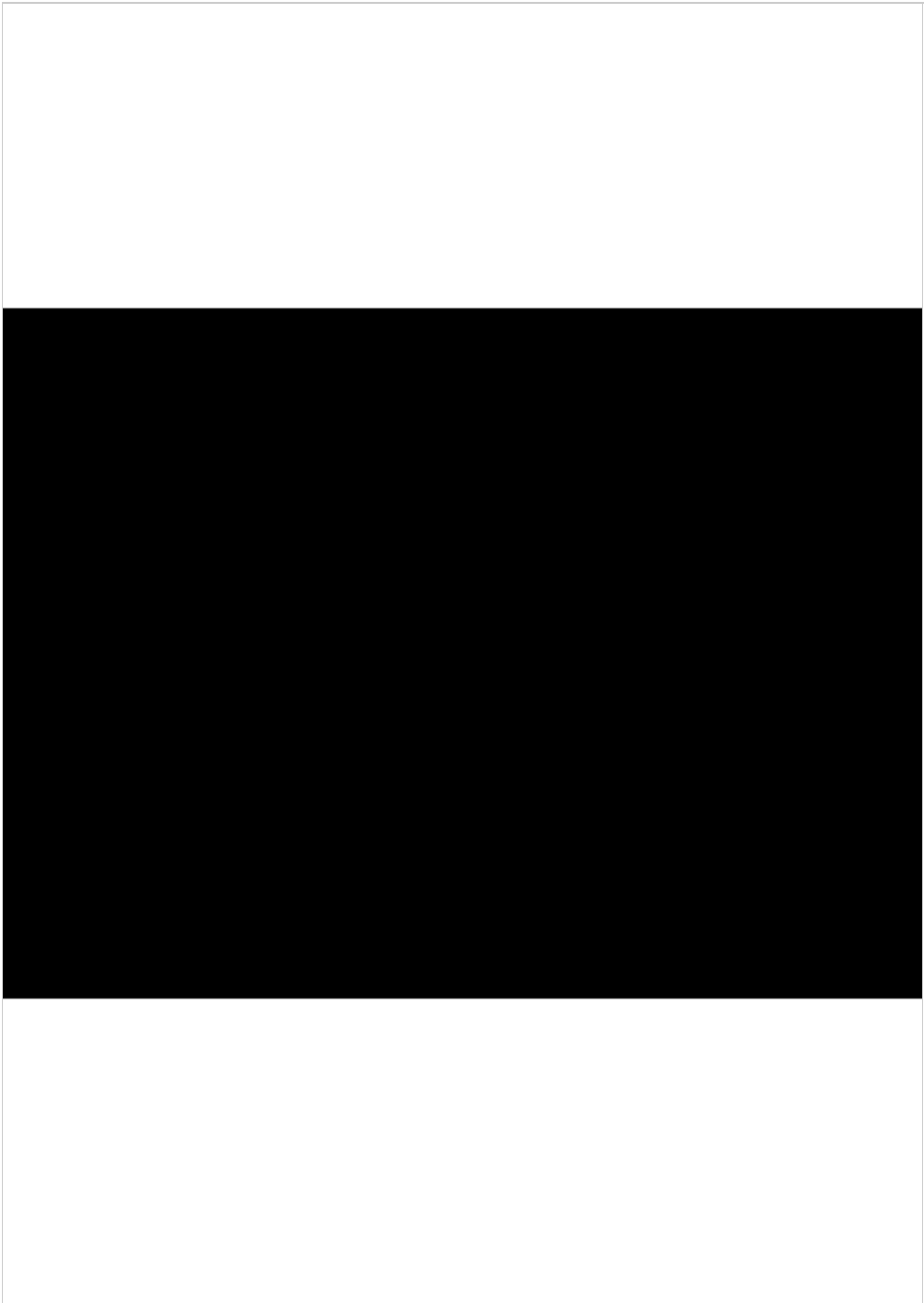


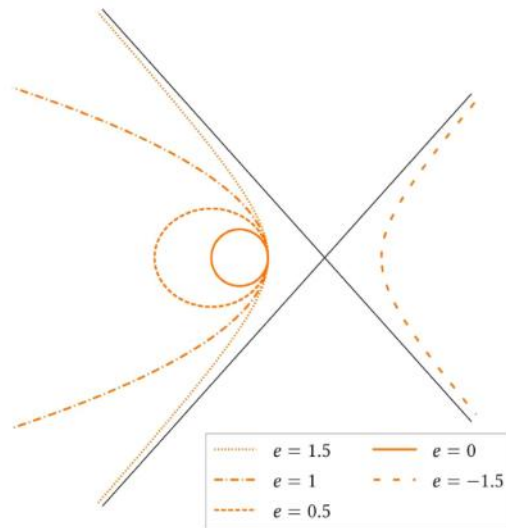




## 2ème Loi de Kepler







LP2: Lois de conservation en dynamique.

jeudi 20 mars 2025 09:08

NIVEAU L2

Prérequis:	Biblio:	Manip:
- PFD/TMC	- Roussille	Pendule pesant: poly TP
- Base relat ?	- Livre prépa	Coussin collision elastique: poly TP + code site agreg duffait p237
- Méca du point	- N'importe quel livre de relat pour compton	Chute libre
		Loi des aires

1. Théorème de Noether et lois de conservation
  - a. Quantité de mouvement
  - b. Énergie mécanique
  - c. Moment cinétique
2. Problème de Kepler (ou problème à deux corps dans force centrale)
  - a. Conservation de L: 2ème Loi de Kepler + plan  
MANIP COUSSIN: LOI DES AIRES
  - b. Conservation de E: États liés/diffusion + trajectoire elliptiques
3. Collisions
  - a. Illustration conservation de EM: Choc élastique  
MANIP COUSSIN: Faire la collision entre deux coussin, numériser les trajectoires, et analyser ça avec le code du poly de TP pour illustrer la conservation de l'EM, discuter du fait que c'est pas élastique...
  - b. Effet Compton (traitement relativiste ?)
  - c. Ouverture physique des particules

1. Conservation de l'énergie mécanique
  - a. Illustration conseravtion de EM: Manip coussin  
Faire la collision entre deux coussin, numériser les trajectoires, et analyser ça avec le code du poly de TP pour illustrer la conservation de l'EM, discuter du fait que c'est pas elastique...
2. Conservation de la quantité de mouvement
  - a. Effet Compton (traitement relativiste ? Si oui y'a un traitement dans le BUP de Yehudi)
  - b. Ouverture physique des particules
3. Conservation du moment cinétique
  - a. Problème de Képler (ou problème à deux corps dans force centrale)
    - i. Conservation de L: 2ème Loi de Képler + plan  
MANIP COUSSIN BIS POUR LOI DES AIRES
    - ii. Conservation de E: États liés/diffusion + trajectoire elliptiques

1. Théorème de Noether et lois de conservation
2. Collisions
  - a. Manip coussin
  - b. Compton
3. Exemple conservation EM avec pendule pesant



# LP3. Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux.

jeudi 20 mars 2025 09:08

Niveau L2:

Manip:

Viscosimètre à bille: fruchard p432

Écoulement de poiseuille: fruchard p441

Biblio:

Guyon

La  
physiqu  
e par la  
pratique  
: Portelli  
, Stokes  
bien  
détaillé

Intro: Du modèle parfait à la viscosité:

Reprendre l'équation de bernoulli et montrer que l'équation est écrite pour tout fluide, hors montrer écoulement d'une huile vs l'eau, ça coule pas pareil... modèle parfait est donc incomplet ! Il manque (au moins) un ingrédient: la viscosité !

1. Notion de viscosité
  - a. Force volumique de cisaillement: démo avec Couette ? Manip quali couette possible ?
  - b. Modèle microscopique
  - c. Facteurs d'influence et ordre de grandeurs
2. Dynamique des écoulements visqueux
  - a. Navier-Stokes
  - b. Conditions aux limites
  - c. Adimensionnement du problème et nombre de Reynolds (DUNOD PC)
3. Étude à bas Reynolds
  - a. Régime laminaire: Equation de Stokes / Écoulement de Poiseuille: Manip + résolution de l'exercice
  - b. Régime renversable: MANIP QUALI glycérol (exo dans la physique par la pratique)

Conclusion: Ouverture sur la turbulence

## Remarques

*Fluide incompressible => écoulement incompressible. Fluide newtonien = lien contrainte et déformation linéaire. Fluides particuliers sont notamment mis à profit dans l'agroalimentaire, les cosmétiques et les peintures. Dans le cas général (non incompressible), il existe des contraintes normales. La comparaison du nombre  $Re$  à une valeur critique sépare fondamentalement les régimes visqueux et inertiel, et non pas laminaire et turbulent. Le modèle microscopique est ok pour les gaz, pour les liquides il existe Eyring. Bilan :  $NS + \text{div} = 0 + \rho = Cte$  donne 5 équations, d'où 5 CL. Densité liquide =  $10^{28}$  et densité gaz =  $10^{25}$ . Être très rigoureux avec toutes les hypothèses/modèles. Autres nombres sans dimension existent (Guyon).*

# LP4. Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide.

jeudi 20 mars 2025 09:08

Niveau L2:

Manip:  
Fruchard: Venturi + Coanda + Pitot

Manip: Vérification de Bernouilli  
Fruchard: Marche nickel

Ref: Dunod  
Intro à la dynamique des fluides  
Fruchart

La physique par la pratique: Portelli, Stokes bien détaillé

Prérequis:  
Description du fluides en mouvements  
Navier-Stokes

Niveau PC.

Intro: Navier-Stokes complexe à cause que non linéaire (pas toujours soluble). On veut donc un modèle plus simple pour étudier certains cas.

1. Approximation de l'écoulement parfait  
Fluide parfait = pas de viscosité, écoulement d'un fluide parfait = écoulement parfait, mais pas l'inverse. Le point c'est de négliger les phénomènes diffusifs. (donc grand Re, mais c'est pas parce que grand Re que nécessairement parfait exemple de la turbulence)  
a. Équation d'Euler  
Bien dire que y'a pas de diffusion thermique notamment, donc écoulement isentropique. (acoustique, mais je sais pas si faut le mentionner ici)  
b. Conditions aux limites et couche limite  
Voir Roussille plan, et pdf  
c. Théorème de Bernouilli  
Faire la démo, bien donner les hypothèses : stationnaires, incompressible et homogène dans pesanteur uniforme dans ref galiléen  
Démo: Euler, on réécrit l'accélération advective en rot, puis Stokes ostrograd en intergrant et hop
1. Conséquences et applications  
a. Tube de Pitot (MANIP QUANTI)  
b. Effet Coanda (MANIP QUALI)  
c. Effet Venturi  
d. Expérience de Torricelli  
Beaucoup d'appliacion ça fait un peu catalogue, essayer de trouver les bonnes transi, et pas forcément tout mettre

Type d'interface	Ecoulement parfait (Euler)	Ecoulement visqueux (Navier-Stokes)
Paroi solide	$(v_{\perp})_{fluide} = (v_{\perp})_{paroi}$ $p_{fluide} = p_{paroi}$	$\vec{v}_{fluide} = \vec{v}_{paroi}$ $p_{fluide} = p_{paroi}$ $\sigma_{xz} = \eta \frac{\partial v_x}{\partial z}$
Interface fluide (sans tension de surface)	$(v_{\perp})_1 = (v_{\perp})_2$ $p_1 = p_2$	$\vec{v}_1 = \vec{v}_2$ $p_1 = p_2$ $\eta_1 \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)_1 = \eta_2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)_2$
Interface fluide (avec tension de surface)	$(v_{\perp})_1 = (v_{\perp})_2$ $P_1 - P_2 = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$	$\vec{v}_1 = \vec{v}_2$ $(\sigma_{ij} n_j)_1 - (\sigma_{ij} n_j)_2 = -\gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) n_i + \left\{ \vec{\nabla} \gamma \right\}_i$

TABLE 1.2 – Tableau récapitulatif des conditions aux limites.

1. Statique des fluides  
a. Particule de fluide  
b. Contraintes et pression volumique
2. Dynamique des fluides  
a. Description lagrangienne  
b. Equation d'Euler
3. Théorème de Bernouilli et application  
a. Venturi  
b. Torricelli  
c. Pitot

# LP5. Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides.

jeudi 20 mars 2025 09:08

Quanti:	Quali
Goutte pendante (p72 Divers)	
Loi de Jurin	
Balance d'arrachement	
	Murissement d'Ostwald
Cuve à onde	

1. Notion de tension de surface
  - a. Définition thermodynamique
  - b. Interprétation en terme de force linéique
2. Equilibre d'une interface
  - a. Loi de Laplace
  - b. Loi de Young-Dupré
  - c. MANIP BALANCE D'ARRACHEMENT
3. Capillarité
  - a. Loi de Jurin
  - b. MANIP JURIN
4. Ouverture:
  - a. Compétition gravito/capilaire, goutte pendante, ondes

Intro:

Vous êtes déjà familier avec l'idée qu'une interface provoque l'émergence de phénomènes en physiques, vous avez par exemple l'exemple de la loi de Snell-Descartes en Optiques, ou les lois de passages en Électromagnétismes. C'est peut-être pas toujours apparent clairement, mais sachez que le point commun entre ces phénomènes, c'est une considération physique bien plus large qui est la conservation de grandeurs, et la minimisation de l'énergie.

Aujourd'hui, on va s'intéresser à des interfaces « mécanique » entre fluides, ou supports. Pour illustrer, vous avez là sur la table un trombone qui flotte sur l'eau. Hors si l'on en croit les valeurs des densités de l'aluminium et de l'eau, il devrait couler ! Voyons ensemble pourquoi...

## 1/ Notion de tension de surface

A-Définition thermodynamique

# LP6. Premier principe de la thermodynamique.

jeudi 20 mars 2025 09:09

Manip:

- Moteur Stirling (description de l'exo Stéphane Olivier/Hubert Gié, Thermodynamique 1ère et 2ème année tec et doc
- Masse en eau du calorimètre

1. Travail
2. Chaleur
3. 1er principe et application
  - a. Moteurs
  - b. Cycle de Carnot

Niveau: PCSI

Biblio:  
Roussille  
Diu  
Tec et doc  
Stephane Olivier

Prérequis:

- GP et diagramme de clapeyron
- Notion d'énergie interne (passage micro macro)

Problématique: comment fonctionne un moteur ?

Intro: On va se poser la question comment fonctionne un moteur ?

1. Cadre de l'étude
  - a. Présentation de la manip: Moteur de Stirling
  - b. Définition du système (fermé à l'équilibre)
  - c. Point notations
2. Bilan d'énergie
  - a. Travail et chaleur (bien insister sur les notations entrant sortant)
  - b. Premier principe de la thermodynamique
  - c. Représentation graphique: diagramme de Clapeyron
3. Retour sur la moteur de Stirling
  - a. MANIP
  - b. Rendement théorique maximal: cycle de Carnot

Conclusion:

En route vers le second principe

1. Intro: On a vu que pour décrire des systèmes à N particules, la thermo c'est bien, en méca on avait une démarche de faire des bilans de forces, maintenant on va parler de bilans d'énergie. La démarche est la même, on prend juste les meilleurs outils pour faire le problème comme avant avec TMC etc
2. Système thermodynamique et sources d'énergies
  - a. Notion de systèmes (ouverts, fermés, isolés)
  - b. Travail des forces de pressions, transformations iso et monobare lien clapeyron
  - c. Transfert thermique et chaleur
3. Bilan d'énergie et transition de phases
  - a. Énoncé du premier principe
  - b. Enthalpie d'un système et capacité thermique (exercice calo + manip)
  - c. Enthalpie de transition de phase (MANIP SF6 permet le liant péda avec les prérequis, et boucle le chapitre)
4. Conclusion:

Prochain chapitre on aura la même démarche à propos d'une nouvelle grandeur physique qu'est l'entropie, et on fera le lien avec ce qu'on a vu aujourd'hui pour étudier la raison d'être de la thermo que sont les machines thermiques

# LP7. Transitions de phase.

jeudi 20 mars 2025 09:09

Manip:  
Température de Curie (Jolidon)  
SF6 (Fruchard)  
Calo (Jolidon)

Niveau: L3  
  
Prérequis: Potentiels thermo  
Ensemble canonique

Ref:  
Diu phy stat/thermo  
Papon transision de phase  
Texier Phy stat

1. Généralisation des transitions de phases
- a. Définitions Erhenfest: notions d'énergie et de dérivée

b. Utilisation des potentiels thermos: minimisation et transition liquide-vapeur

c. Définition de Landau: paramètre d'ordre

d. Introduction à la criticalité: retour sur liquide-vap
2. Transition ferro-para
- a. Résolution en phy stat ?

b. MANIP CURIE

En gros on repart des potentiels thermos qu'on peut représenter et on dit que les minimiser ça sert à tout.  
Si on le fait et qu'on regarde la dérivé en fait on retrouve le diagramme PV, c'est plus riche parce qu'on voit directement pourquoi c'est possible d'avoir de la surfusion etc. Démo dans le Diu, ou dans le Papon

1. Approche historique
2. Cag d'état
3. Autres

1. Intro:  
On a vu en thermo comment on décrit une transition de phase en terme de chaleur latente ou pas... c'est la définition de Erhenfest. Mais elle a des limites, ie il existe des transitions de phases qui n'ont pas de chaleur latente mais des discontinuités (magnétime, transition superfluide) qu'on va discuter dans ce cours, mais du coup besoin d'une nouvelle classification
2. Classification de Laudau
- a. Définition de phase, de transition, de fluctuation

b. Paramètre d'ordre

1. Intro:  
Vous avez l'habitude des transitions de phases dans la vie de tout les jours, et c'est super vaste ! Tenter de faire le lien entre tout ça est

2. Magnétisme en physique statistique

# LP8. Phénomènes de transport.

jeudi 20 mars 2025 09:09

Manip:

- Conduction thermique dans un métal (Fruchard)
- Conduction électrique dans un métal (Fruchard)
- Diffusion du glycérol dans l'eau (Jolidon)

Niveau: L2

Prérequis: Électromag / Thermo / Mécanique du point / Mécanique des fluides

Bibilo:

Transferts thermiques Jean Taine Jean-Pierre Petit

1. Généralité sur le transport
  - a. Définition
  - b. Modes de transports
  - c. Hypothèses des modèles (eq thermo local)
2. Transport dans les solides
  - a. Modèle de Drude (conduction électrique + manip)
  - b. Loi de Fourier (conduction thermique + manip mesure 4 fil)
  - c. Loi de WF
3. Transport de matière
  - a. Loi de Fick + manip glycérol
  - b. Analogies

Conclusion: On a pas parler de transport par rayonnement, c'est le plan du prochain cours où on parlera de bilan radiatif, d'effet de serre etc, pensez à réviser vos bilans d'énergies.

LP9. Conversion de puissance électromécanique.

jeudi 20 mars 2025 09:09

- Manip:
- Machine à courant continu (Jolidon)

Bien séparer alim des inducteurs et de l'induit !

La MCC ça marche nickel, faire 2 mesures:

- Mesurer le facteur k (pour ça, alimenter inducteur et induit moteur avec deux alims, et mesurer U et I induit à Inducteur constant, puis tracer  $U/I = f(\Omega/l)$  car  $U = E + RI = k\Omega + RI$
  - Puis rendement moteur: les deux inducteurs en parallèle à tension constante, et mesurer I induit moteur,  $\Omega$ , et C. Puis tracer  $\Omega = f(C)$  et  $\eta = f(C)$  avec  $\eta = (\Omega * C) / (U_{induit} * I_{induit} + U_{inducteur} * I_{inducteur})$
- On peut faire le rendement moteur avec une résistance plus grande dans l'induit que les 10 internes, et on voit une chute du rendement, plus élevé quand C est grand (car si C grand, I grand, donc perte en chaleur plus grande)
- Bien faire attention à remettre les mêmes tensions dans l'inducteur et l'induit pour pouvoir comparer les points de mesures !

Ref: poly de J. Neveu sur le drive de l'agreg ou sur le site de christophe

Tout le cours est dans le Dunod PSI >2017  
Détails dans Énergie électrique Luc lasne

Niveau: PSI (voir programme)  
Préquis: Électromag/Induction  
Mécanique du point  
Énergie et force EM  
Contacteur EM

- Machine Synchrone
  - Structure
  - Champ dans l'entrefer
  - Stator/Rotor
  - Énergie/Couple
  - Condition de synchronisme
  - Modèle électrique
- Machine à courant continu
  - Structure
  - Collecteur
  - Couple/Fem
  - MANIP et rendement

Dans la partie « **Conversion électro-magnéto-mécanique** », on privilégie un calcul des actions électromagnétiques en dérivant l'énergie magnétique stockée dans le système par rapport à un paramètre de position notamment afin de prendre en compte le rôle du fer. Les milieux magnétiques sont modélisés par des milieux linéaires. La notion de coénergie est hors programme.

Dans une première partie, la méthode de calcul de la force s'exerçant sur une partie mobile de fer est illustrée sur un contacteur en translation faisant partie d'un circuit magnétique dont l'entrefer est variable. À l'aide d'un bilan énergétique, le professeur pourra justifier la relation  $F = (\partial E / \partial x)$  mais cette démonstration ne doit pas être considérée comme une capacité exigible.

On aborde ensuite le moteur synchrone en dérivant l'énergie magnétique localisée dans l'entrefer afin de déterminer le moment du couple électromagnétique. Les champs glissants statorique et rotorique sont radiaux dans l'entrefer et présentent des formes d'onde sinusoïdales. On montre que le moment moyen est non nul si les champs glissants sont synchrones. Le modèle électrique des phases de l'induit est abordé afin de décrire la conversion électromécanique de puissance, mais on n'étudiera pas l'utilisation d'une machine à vide comme compensateur synchrone.

Dans un troisième temps, le fonctionnement du moteur à courant continu est traité par analogie avec le moteur synchrone, en montrant que le collecteur réalise le synchronisme entre un champ statorique stationnaire et un champ rotorique qui lui est orthogonal quelle que soit la position angulaire du rotor, produisant ainsi un moment maximal.

On évoque enfin la réversibilité énergétique des machines électriques, en distinguant avec rigueur force électromotrice (fem) et force contre-électromotrice (fcm). La puissance mécanique des machines est reliée à la puissance électrique des forces électromotrices induites à l'aide de bilans énergétiques.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>5.3. Conversion électro-magnéto-mécanique</b>	
<b>5.3.1. Contacteur électromagnétique en translation</b>	

Énergie et force électromagnétique.	Exprimer l'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable. Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur une partie mobile en translation en appliquant l'expression fournie $F = (\partial E / \partial x)$ .
Contacteur électromagnétique.	Sur l'exemple du relais, expliquer le fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.
<b>5.3.2. Machine synchrone</b>	
Structure d'un moteur synchrone à pôles lisses et à excitation séparée. Champ magnétique dans l'entrefer.	Décrire la structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire : rotor, stator, induit, inducteur. Exprimer, pour une machine de perméabilité infinie à entrefer constant, le champ magnétique dans l'entrefer généré par une spire passant dans deux encoches opposées. Expliquer qualitativement comment obtenir un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale dans l'entrefer en associant plusieurs spires décalées.
Champ glissant statorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant statorique lorsque les deux phases sont alimentées en quadrature.
Champ glissant rotorique.	Justifier l'existence d'un champ glissant rotorique associé à la rotation de l'inducteur.
Énergie et couple.	Exprimer l'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer en fonction de la position angulaire du rotor. Calculer le moment électromagnétique s'exerçant sur le rotor en exploitant l'expression fournie $\Gamma = \partial E / \partial \theta$ .
Condition de synchronisme.	Justifier la condition de synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique afin d'obtenir un moment moyen non nul. Discuter qualitativement la stabilité du système en fonction du déphasage entre les deux champs glissants. Expliquer la difficulté du démarrage et du contrôle de la vitesse d'un moteur synchrone.
Modèle électrique de l'induit.	Établir les équations électriques vérifiées par les phases de l'induit en admettant les expressions des coefficients d'inductance ; donner les représentations de Fresnel associées. Justifier, à l'aide d'un bilan énergétique où seules les pertes cuivre sont envisagées, l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les fcm et la puissance mécanique fournie.

Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine synchrone en alternateur.
Machine synchrone.	Citer des exemples d'application de la machine synchrone.
<b>5.3.3. Machine à courant continu</b>	
Structure d'un moteur à courant continu à pôles lisses.	Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.
Collecteur.	Expliquer, par analogie avec le moteur synchrone, que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.
Couple et fcm.	Citer l'expression du moment du couple $\Gamma = \Phi i$ et établir l'expression de la fcm induite $e = \Phi \Omega$ par un argument de conservation énergétique. Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques. Établir les équations électrique et mécanique. Tracer la caractéristique $(Q, \Gamma)$ à tension d'induit constante. Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment $- f.Q$ . <b>Mettre en œuvre un moteur à courant continu.</b>
Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice. Choisir des conventions d'orientation adaptées.
Machine à courant continu.	Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.

# LP10. Induction électromagnétique.

jeudi 20 mars 2025 09:09

Manip:

- Transformateur (Duffait)
- Loi de Faraday (Duffait CAPES)
- Inductance mutuelle

Transformateur marche nickel, c'est long si on veut exploiter le truc à fond avec le rendement, mais c'est propre parce qu'on peut discuter les pertes fer et cuivre. Check dans les programmes de prépas le modèle du transfo si parfait ou pas pour la discussion des pertes.

1. Étude à vide
  - a. Mesure  $I_1, U_1, P_1$  et  $U_2$
  - b. Mesure  $I_1, U_1, P_1$  et  $I_2$   
Permet de calculer le coeff  $m$  de transfert, et d'estimer l'écart à l'idéalité
2. Étude en charge
  - a. Mesurer à  $U_1$  constant, tout en fonction de la charge, pour en déduire le rendement en fonction de la charge  
Modèle d'application direct

Ref: Drive poly de J. Neveu en électromeca

Niveau PCSI

Ref Dunod principalement  
Quaranta, et poly de TP

1. Phénomène d'induction et lois fondamentales
  - a. Mise en évidence expérimentale (aimant dans une bobine branché à l'oscillo voir en dessous)
  - b. Loi de Lenz
  - c. Loi de Faraday
2. Applications
  - a. Auto-inductance et inductance mutuelle (MANIP Quaranta tome 4)
  - b. Modèle du transformateur parfait (MANIP transfo)
  - c. Discussion autour des pertes... mise en évidence des courants de Foucault, ouverture

1. Circuit fixe dans un champ variable: induction de Neumann
  - a. Auto-inductance et inductance mutuelle
  - b. Modèle du transformateur parfait (MANIP transfo)
  - c. Discussion autour du rendement et des pertes... existence de pertes ?

2. Circuit mobile dans un champ stationnaire: induction de Lorentz
  - a. Mise en évidence des courants de Foucault (retour sur la manip !) et force de Laplace

Ressources:

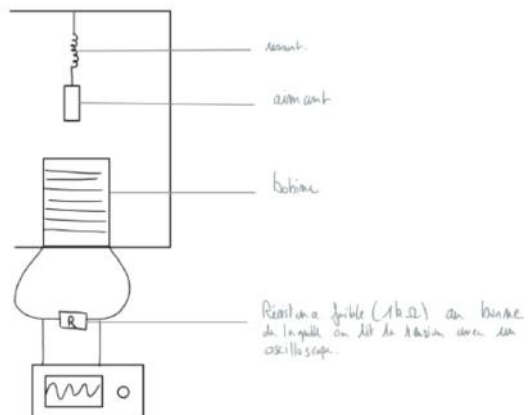
Garing magnétisme p182: exo inductance mutuelle

H prépa électromag PSI PC

Tout le cours est dans le Dunod PCSI (Sanz)

Transfo (parfait et réel) dans PSI électrotech, les nouveaux précis Bréal  
+ énergie électrique luc lasne





# LP11. Rétroaction et oscillations.

jeudi 20 mars 2025 09:09

Manip:

- Pont de Wien (Duffait Elec, Krob elec expérimentale)
- Critère de Barkausen (Duffait Elec)
- ALI pour ampli pour rétroaction

## 1. Rétroaction

- Pourquoi c'est nécessaire ? Exemple de la mesure du temps
- Comportement en boucle fermé. Calcul de la fonction de transfert
- Caractérisation de la stabilité. Comp rateur   hystérésis

## 2. Application

- Amplificateur
- Oscillateur de Wien et condition de Barkausen

Manip:

- Pour tracer un Bode, faire réponse indicielle (créneau basse fréquence, grande amplitude (10Vpp), donc  $T \gg \tau$  du filtre), et enregistrer la réponse sur Latispro (faire attention à l'échantillonnage, on veut  $t \ll \tau$ , et pas trop de point pour pas tuer Latis), on fait la dérivée, on fait la TF en amplitude et en argument de la dérivée. Trig avec seuil montant pour clean le signal. Lisser le signal et la dérivée si besoin. On fourre tout dans python. GG.
- Sinon on fait un sweep, on synchronise le trig du sweep et latis pro avec la deuxième voie du GBF, on passe la sortie par un détecteur de crête et gg

Wien : simulation dans ./Rennes

## 1. Rétroaction

- Système bouclé
- Condition de Barkausen

## 2. Oscillateur

- Wien

# LP12. Traitement d'un signal. Étude spectrale.

jeudi 20 mars 2025 09:10

## Manip:

- Doppler et détection synchrone (
- CAN/CNA- Carte sysame
- Filtre Passe-bas, passe-bande (Duffait Elec)
- Critère de Shannon-Nyquist
- Décomposition spectrale Fourier
- Réponse indicielle (KROB)
- Fréquencemètre
- échantillonnage

## Prérequis:

- Fourier
- Électrocinétique de base

## Intro:

Déjà c'est quoi un signal ? Questions du cours, comment on le comprend, l'enregistre, le propage

### 1. Notion de spectre

- a. Signal analogique vs numérique (commenter qu'on va s'intéresser au 2 tout le long avec code couleurs ou tableau)
- b. Décomposition spectrale, réponse indicielle ? (faire une acquisition de diapason, un pic, puis corde ou whatever plusieurs pics)
- c. Filtres (faire un filtre analogique qui tue le signal en direct, application des fonctions de transferts)

### 2. Enregistrer un signal: numérisation (montage Matilde)

- a. Fréquencemètre (faire le montage quali si possible)
- b. CAN (utiliser le CAN préfa pour montrer qu'on peut compter différente tension)
- c. Echantillonnage (parler de shanno-nyquist, démo sur un signal de GBF pour repliement)

### 3. Propager un signal

- a. Modulation-Démodulation (démo en live ?)
- b. Application détection synchrone et Doppler

## Conclusion:

On a parlé de comment traiter un signal, l'enregistrer et le propager,

### 1. Notion de spectre

- a. Signal (analogique et numérique)
- b. Numérisation ?
- c. Décomposition spectrale et réponse indicielle

### 2. Filtrages

- a. Fonction de transfert et diagramme de Bode: exemple d'un filtre passe-bas (avec MANIP)
- b. Exemple du casque anti-bruit (MANIP quali)

### 3. Modulation

- a. Application synthé: modulation en amplitude et en fréquence

b. Application transport: détection synchrone

# LP13. Ondes progressives, ondes stationnaires.

jeudi 20 mars 2025 09:10

Manip:

- Corde de Melde (Quaranta 250ish)
- Tube de Kundt (Fruchard)
- Cuve à onde (mesurer la fréquence avec une photodiode (c'est dans le poly d'optique, faut polariser en inverse dans la borne - d'un ALI, voir photo) Échelle à faire au fond de la cuve !!)

Niveau L2/PC

Prérequis: Mécanique du point

Équations différentielles

Intro sur le fait que les ondes sont partout en physique, du son, la lumière la matière même avec la dualité onde-corpuscule vu au lycée... on va voir comment on peut modéliser une onde. Pour illustrer le propos, cuve à onde, onde radio ?, corde de melde

1. Généralités sur la propagation des ondes
  - a. Définitions
  - b. Exemple de Modélisation corde vibrante (51 Leçon +roussille P+cours Camille)  
Partir de l'exemple de la corde vibrante en méca, poser le problème et obtenir l'éq de d'Alembert
  - c. Solution propagative
  - d. Aspects énergétique
  - e. Généralisation d'Alembert régie toute les ondes (PREUVE PAR MANIP, acoustique temps de vol pour déterminer c)
2. Solution particulière et conditions limites
  - a. Corde de Melde (MANIP on voit des formes d'ondes bizarre ? c'est quoi ?) Onde stationnaires
  - b. Vérif expérimentale
  - c. Situation à nouveau générale tube de Kundt quali

Conclusion les ondes c'est très générale, c'est modélisable (dans certains cas) par d'Alembert, et on a vu les possibles solutions. Le point commun c'est le couplage spatio-temporel entre deux grandeurs.

REF:

Cours camille

Livre prépa (ondes hprépa, stephane olivier, dunod)

Tout le calcul pour la corde est dans le dunod p886

Infos dans le 51

Manip: Kundt dans Fruchart

Melde dans poly TP (+Quaranta 1 Méca)

1. Généralités sur la propagation des ondes.
  - a. Électromagnétisme et équation de D'Alembert
  - b. Modèle d'ondes dans différents domaines de la physique
  - c. Notion d'impédance

LP14. Ondes acoustiques.

jeudi 20 mars 2025 09:10

Manip:  
HP  
Kundt?

Télémétrie acoustique pour mesurer le fond de océan, ou trou d'young acoustique  
Vitesse dans un solide onde p et s

Manip: Propagation libre marche nickel dans l'air et dans l'eau. Dépendance en température dans l'eau à l'air nickel (moins rapide dans le froid) faut check modèle masi ça doit dépendre de rho(T)  
Télémétrie dans l'eau un enlér, essayer avec le dural ?  
Télémétrie dans l'air très très efficace.

Niveau PC/L2  
Ref: Garing Onde mécaniques et diffusion  
Dunod  
Cours Méca flu issu de Roussille Plan  
Livres prépa

6.1.2. Ondes acoustiques dans les fluides	
Approximation acoustique. Équation de d'Alembert pour la surpression acoustique.	Classer les ondes acoustiques par domaines fréquentiels. Valider l'approximation acoustique. Établir, par une approche eulérienne, l'équation de propagation de la surpression acoustique dans une situation unidimensionnelle en coordonnées cartésiennes. Utiliser l'opérateur laplacien pour généraliser l'équation d'onde.

© Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, 2021  
<http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>  
Physique PC

26

Plan F:

- Equation de propagation et célérité
  - Equation de couplage
  - Equation de propagation
  - Influence de la température
- Caractéristiques des solutions
  - OPPH
  - Impédance acoustique
  - Aspects énergétiques

Niveau L2  
Prérequis: ondes, EM, méca flu, thermo

- 1: Hypothèse de travail:  
Fluide parfait  
.pg négligé  
Au repos initialement  
Perturbation  
Bilan sur P, u, v avec hypothèses  
Conservation de la masse, Euler -> trop d'inconnues  
On linéarise

Célérité des ondes acoustiques.	Exprimer la célérité des ondes acoustiques en fonction de la température pour un gaz parfait.
Ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.	Exploiter la notion d'impédance acoustique pour faire le lien entre les champs de surpression et de vitesse d'une onde plane progressive harmonique. Utiliser le principe de superposition des ondes planes progressives harmoniques.
Densité volumique d'énergie acoustique, vecteur densité de courant énergétique. Intensité sonore. Niveau d'intensité sonore.	Utiliser les expressions admises du vecteur densité de courant énergétique et de la densité volumique d'énergie associés à la propagation de l'onde. Citer quelques ordres de grandeur de niveaux d'intensité sonore.
Ondes acoustiques sphériques harmoniques.	Utiliser une expression fournie de la surpression pour interpréter par un argument énergétique la décroissance en 1/r de l'amplitude.

- Approximation acoustique et équation d'onde
  - Description du problème  
Bien lister toute les hypothèse le dev perturbatif et tout
  - Equation de propagation  
Démontrer équation de l'Alembert à partir de l'équation de conservation de la masse et de l'hypothèse isentropique (justifié par Euler)
- Onde progressive, onde stationnaires
  - OPPH, application télémétrie ( MANIP QUANTI de c (fct de T ?) + télémétrie)
  - Onde stationnaire, tube de Kuntz (MANIP ?)
- Conclusion: Lien entre les deux régimes
  - Notion d'impédance
  - Réflexion/transmission
  - Notion énergétique

- Approximation acoustique
  - Description du problème  
Bien lister tout
  - Equation de l'Alembert
  - Impedence acoustique
- Application:
  - Télémétrie

Bouquin: Hprépa Ondes  
Ondes mécaniques Garing

Si Euler, on a pas de viscosité, donc pas de processus dissipatif, donc ça justifie pourquoi on est obligé d'être adiabatique (par rapport à isotherme).  
Négligé l'aspect dissipatif, interdit le transport de chaleur de proche en proche, donc Xs et ça marche bien.

Kundt très bien comme manip mais il faut les solutions stationnaires présentés. Là impédance acoustique et aspect énergétique ça rentre bien dans la leçon, mais pas raccord avec la manip.

Éviter les points au bords du tube pour la condition de bord

# LP15. Propagation guidée des ondes.

jeudi 20 mars 2025 09:10

1.

Manip:

Banc hyperfréquence

Cable coaxial

Fibre ?

Maths:

Full démo mode TE/TM (cours de Camille)

Idée: changer la forme du signal, ajouter du bruit... exploiter à fond !

Ref:

9 ways of defining the velocity of a signal

Field and waves of electromagnetism david k cheng

<https://www.etienne-thibierge.fr/agreg.php>

Le cours de camille de a à z, c'est une masterpiece.

Surement des détails dans les livres de prépas

Tube acoustique marche nickel, prendre un tube de 4m pour bien séparer les modes, y'a un BUP pour quantifier le facteur  $\mu$  voir plan Roussille

Intro: On a vu comment se propage une onde, pour une onde sphérique (typiquement issu d'une antenne telecom) l'énergie se répartit partout et de manière générale on peut se demander ce qui se passe quand on cherche à "canaliser" l'onde pour avoir toute l'énergie de cette onde au même endroit. Vu qu'une onde c'est un couplage spatio-temporelle de grandeur, mettre des conditions aux bords impactent les équations...

1. Propagation guidée entre deux plaques métalliques
  - a. Découplages des équations de Maxwell - Modes TE/TM
  - b. Analyse du mode TE
  - c. Dispersion due aux conditions aux limites

Mises en évidences expérimentales des modes en acoustiques (temps de vol libre, un signal à c, in the tube plusieurs paquets, et on peut quanti ça Fruchart)
  - d. Modes TM et TEM
2. Application à la propagation d'un signal
  - a. Fermeture du guide pour application réel - Guide rectangle (Manip banc hyperfreq ici ?)
  - b. Optimisation du guide pour la transmission d'information - recherche d'un TEM
  - c. Cable coaxiale  
(MANIP: mesure de c)  
Aller au bout de l'exploitation avec différentes forme de signal pour simuler des intempéries ?

Conclusion: ouvrir sur la fibre optique

1. Propagation guidée dans un guide rectangulaire
  - a. Découplages des équations de Maxwell
  - b. Modes TE/TM - Fréquences de coupures - Vitesses de groupes (DEMO MANIP QUALI)  
Mises en évidences expérimentales des modes en acoustiques (temps de vol libre, un signal à c, in the tube plusieurs paquets, et on peut quanti ça Fruchart)
  - c. Existence d'un mode TEM
  - d.
2. Optimisation du guide pour la transmission d'information
  - a. Cable coaxial
  - b. (MANIP: mesure de c)
  - c. Aller au bout de l'exploitation avec différentes forme de signal pour simuler des

intempéries ?

d. Fibre optiques



# LP16. Microscopies optiques.

jeudi 20 mars 2025 09:10

Manip:

Mesure de la puissance du microscope.

Tout est détaillé dans le Bellier CAPES Optique, ou dans le BUPn775 (ou Sextant p 30)

À noter:

- Pré-aligner le banc optique au laser avec un diaphragme avec toutes les lentilles poser dessus (tout doit passer par le centre)
- Pour l'œil faire l'image à l'infini avec auto collimation
- Prendre des focales adaptées (160 pour l'objectif, 200 pour l'oculaire, 300 pour l'œil do the trick)
- Attention à prendre les bonnes distances dans le code !

Globalement le plan de Roussille est très bien. Et possède plein de ref !

Niveau L2.

Prérequis:

- Optique Géométrique
- Diffraction
- Transformée de Fourier

Intro:

On va s'intéresser dans ce cours à comment observer des objets petits.

La première méthode, plutôt directe.

## 1. Microscope à deux lentilles

- Schématisation
- MANIP QUANTI Puissance du microscope
- Limitations (diaphragme de champs, critère de Rayleigh, MANIP)
- Autres applications (Microscope en lumière polarisée en géologie)

Transition: comment on fait pour voir des objets transparents ?

## 2. Microscope à contraste de phase

La physique en applications 150 problème (attention à l'édition)

Onde lumineuses Champeau

y'a une page dans le Taillet

Transition: comment on fait pour voir des objets 3D du vivant ?

## 3. Microscope confocale laser à fluorescence

Technique de l'ingénieur sur mon site

Le bouquin "imager l'invisible avec la lumière" j'ai mis ce qu'il faut sur le site

Conclusion:

De manière générale, il existe plein de microscope optique qu'on a pas cité, c'est toujours une histoire de compromis ou qu'est qu'on veut regarder.

Il existe d'autres type de microscope non optique (à balayage, STM, AFM) pour voir le petit qu'on va pas développé ici, mais c'est super important

# LP17. Interférences à deux ondes en optique.

jeudi 20 mars 2025 09:10

Manip:  
Fente d'Young (Sextant ?)  
Brouillage sodium (Fruchard)

Niveau L2  
Ref: Fruchard  
Ondes lumineuses  
Optique Physique taillet  
Dunod PC

## Prérequis:

- Modèle scalaire de la lumière
- Notion de train d'onde, de cohérence spatial et temporelle

Phénomène d'interférence connu, en particulier en méca (si cuve à onde pour illustrer c'est top), moins observer en optique au quotidien. On va essayer de comprendre pourquoi et comment on peut obtenir des interférences dans la situation la plus simple possible : deux ondes.

## 1. Superposition de deux ondes

- Terme d'interférence
- Cohérences
- Formule de Fresnel

Toute cette partie est dans le Dunod PC.

On part de deux ondes dans une situation quelconque, on calcule. Ok on a un terme supplémentaire quand les conditions sont bonnes, et c'est assez restrictif ! (on a répondu à la question de l'introduction).

Maintenant on va essayer de voir comment on peut se servir de cette propriété très fine pour faire des mesures précises.

## 2. Exemples d'interféromètre

- Division du front d'onde: Dispositif des fentes d'Young (MANIP mesurer la longueur d'onde du laser, en mesurant l'interfrange en fonction de  $a$  ou  $D$ , calculer si possible)  
Il faut passer du temps sur le calcul de  $i$ , bien montrer le schéma, rigueur sur l'analyse des résultats
- Division d'amplitude: Interféromètre de Michelson (MANIP brouillage)  
Faire le calcul de la différence de marche, et se servir de ce montage pour illustrer le brouillage, la cohérence, la localisation des interférences... aller loin dans le truc en étant rigoureux.

En conclusion, on a vu comment deux ondes se superposent, et comment on peut s'en servir au travers de deux cas typiques, il en existe beaucoup d'autres, et sans rentrer dans l'effet catalogue, on va voir dans les prochains cours d'autres dispositifs et d'autres limites de ce phénomène (cohérence spatiale ?)/

- Sources ponctuelles
  - Formule de Fresnel
  - MANIP
  - Contraste
- Sources étendues ou non monochromatiques
  - Notion de cohérence temporelle
  - Notion de cohérence spatiale
  - MANIP BROUILLAGE + sodium ?

LP18. Interférométrie à division d'amplitude.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Manip:  
Michelson lame d'aire quanti  
Coin d'air quali  
Fabry-Pérot quali ouverture

Pour Fabry Perot et pour michelson plutôt que faire de la trigo chiant: astuces des sources virtuelles (à creuser) mais ça fait des calculs très rapide

Différence réseau/michelson: on peut atteindre des ordres d'interférences très grand ce qui permet de faire les mesures !

Pour une source ponctuelle, on voit les interférences partout (pour tout position de l'écran) mais intensité faible, source étendu, on les voit qu'à un endroit mais beaucoup plus lumineuse. C'est plus pédagogique (se renseigner tout ça)  
Ref sur la localisation des interférences: Jolidon, ondes lumineuses champo, moras, hprépa interférence  
Théorème de localisation des interférences

Ref: Ondes lumineuses  
Jolidon (pour théorème de localisation et cohérence)  
Dunod PC Sanz

- 1. Localisation des interférences
  - a. Condition de non brouillage
  - b. Théorème de localisation
- 2. Interféromètre de Michelson
  - a. Lame d'air, franges d'égales inclinaison (MANIP QUANTI, doublet sodium)
  - b. Coin d'air, franges d'égales épaisseur (MANIP QUALI, passage en coin d'air sous les yeux du jury)
- 3. Interféromètre de Fabry-Pérot
  - a. Intensité de l'onde transmise (CODE)
  - b. Finesse (MANIP QUALI, on résout le doublet !! On pourrait le quantifier en faisant ça et ça)

- 1. Lame d'air
  - a. Manip
  - b. Théorie
- 2. Coin d'air
  - a. Manip
  - b. Théorie
- 3. Fabry-Pérot



LP34\_2017  
\_Interféro...

LP34 – INTERFÉROMÉTRIE À DIVISION D'AMPLITUDE

17 novembre 2016

David Dumont & Camille Eloy

Les interférences elles sont là que si on les regarde.

JOJO

Niveau : L2

Commentaires du jury

- 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.

Jusqu'en 2013, le titre était : *Interféromètres à division d'amplitude. Applications.*

- 2005 : Le Michelson n'est souvent utilisé qu'en lame d'air. Les problèmes de localisation et les détails expérimentaux sont rarement présents, tout comme les applications. On peut, pour cette leçon, admettre que les dispositifs par division du front d'onde ont déjà été étudiés auparavant, ce qui permet au candidat d'entrer tout de suite dans le vif du sujet de la division d'amplitude et de son intérêt.

Bibliographie

- Optique, J.-Ph. Perez → Michelson, Fabry-Pérot et certaines de leurs applications
- Ondes lumineuses, R.-J. Champeau → Théorème de localisation des franges
- Optique ondulatoire, J.-M. Brebec, H Prepa → Théorème de localisation des franges
- Optique, S. Houard → Applications du Michelson et du Fabry-Pérot
- Optique expérimentale, Sextant → Réglages du Michelson et du Fabry-Pérot

Prérequis

- Interférences à deux ondes
- Optique géométrique et ondulatoire
- Notion de cohérence
- Interférence à division du front d'onde

Expériences

- Passage de source ponctuelle à étendue pour le Michelson en lame d'air
- Principe de la mesure de l'écart du doublet du sodium avec le Michelson
- Séparation du doublet du sodium avec le Fabry-Pérot

Table des matières

1	Localisation des interférences	2
1.1	Condition de non brouillage	2
1.2	Théorème de localisation	3
2	Interféromètre de Michelson	3
2.1	Lame d'air, franges d'égales inclinaison	4
2.2	Coin d'air et frange d'égale épaisseur	5
3	Interféromètre de Fabry-Pérot	6
3.1	Intensité de l'onde transmise	6
3.2	Finesse et pouvoir de résolution	7

Plans Page 51

## Introduction

On a abordé dans une précédente leçon les interférences à deux ondes, et nous avons montré qu'il existe deux principaux types d'interféromètres :

- division du front d'onde, où la surface d'onde est modifiée,
- division d'amplitude, où le front d'onde reste constant et où l'intensité est modifiée.

Les effets de la cohérence spatiale (source étendue) et temporelle (qualité de la lampe spectrale) sur les figures d'interférences ont été abordés. Dans cette leçon, nous allons nous concentrer sur la division d'amplitude, en insistant sur son intérêt pour s'affranchir des effets de la cohérence spatiale. Nous discuterons également des applications permettant la mesure précise de longueurs d'onde.

## 1 Localisation des interférences

### 1.1 Condition de non brouillage

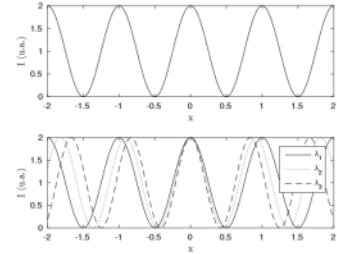


Fig. 1 Figures d'interférence pour une source monochromatique ponctuelle (en haut), étendue (en bas). Dans ce second cas, les systèmes d'interférence créés par chaque point source se superposent ce qui engendre le **brouillage** des interférences.

Considérons un système interférentiel quelconque, éclairé par une source ponctuelle rigoureusement monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ . On se place dans un milieu homogène isotrope d'indice  $n = 1$ . La figure d'interférence obtenue est similaire à celle de la Figure 1 (en haut).

Si la source est étendue mais toujours parfaitement cohérente temporellement, les différents points de la source sont incohérents entre eux et engendrent plusieurs systèmes d'interférences indépendants comme l'illustre la Figure 1 (en bas). Il en résulte un brouillage des interférences. Pour s'affranchir de ce brouillage, la différence de marche  $\delta$  en un point de l'écran ne doit pas dépendre du point source.

On schématise le système précédent par la Figure 2.

Calculons la différence de marche pour les rayons 1 et 2 issus des points sources  $S$  et  $S'$  :

$$\delta(S, M) = [(SM)_1] - (SM)_2 \quad (1)$$

$$\delta(S', M) = [(S'M)_1] - (S'M)_2 \quad (2)$$

La condition de non dépendance de  $\delta$  en la position de la source, dite condition de non brouillage, est alors :

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= \delta(S, M) - \delta(S', M) = 0 \\ \text{i.e.} \quad SM_1 - S'M_1 - (SM_2 - S'M_2) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Ainsi pour  $S$  et  $S'$  proches, la condition de non brouillage devient

2

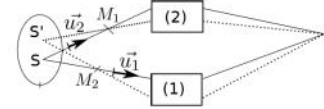


Fig. 2 Modélisation générale d'un interféromètre.

$$S\vec{S}' \cdot (\vec{u}_1 - \vec{u}_2) = 0 \quad (4)$$

Les interférences sont alors localisées au voisinage des points permettant la vérification de cette condition. Il y a donc deux possibilités :

- l'élargissement se fait orthogonalement aux rayons qui interfèrent. Les interférences sont alors délocalisées. Pour les fentes d'Young, cela revient à éclairer le système avec une fente parallèle aux fentes composant le dispositif interférentiel,
- les rayons qui interfèrent vérifient  $\vec{u}_2 = \vec{u}_1$ , i.e les rayons issus du même rayon incident : c'est la division d'amplitude.

### 1.2 Théorème de localisation

#### Théorème de localisation

Seuls les interféromètres à division d'amplitude donnent lieu à l'observation d'interférences contrastées pour une source étendue. Alors ces interférences sont localisées au voisinage des points d'intersection des rayons issus du même rayon incident.

Ce théorème va nous accompagner tout au long de la leçon. Appliquons le pour commencer à l'interféromètre de Michelson.

## 2 Interféromètre de Michelson

À la fin du 19<sup>e</sup> siècle, Michelson met au point un interféromètre qui porte aujourd'hui son nom dans l'optique de montrer l'existence de l'éther (expérience qui a finalement démontré le contraire!). Il reçu le prix Nobel en 1907 "pour ses instruments optiques de précision ainsi que les études spectroscopiques et métrologiques menées avec ceux-ci". La composition de son interféromètre est la suivante :

- Deux miroirs métallisés, notés  $M_1$  et  $M_2$ , ajustables grâce aux vis de réglages  $C_1, C_2, A_1, A_2$ .
- Un dispositif semi-réfléchissant séparant le faisceau incident en deux rayons d'égale intensité, que l'on fait interférer. Il est composé de deux lames à faces parallèles. La séparatrice, traitée sur l'une de ses faces pour être semi-réfléchissante, assure la division du faisceau incident en deux nouveaux rayons d'intensité moindre. La compensatrice évite elle d'éventuels astigmatisme et dispersion dans le verre lors de l'utilisation de sources étendues ou polychromatique. Elle permet également de pouvoir considérer le système semi-réfléchissant comme d'épaisseur nulle, en évitant toute différence de marche entre les rayons des différents bras.

On peut modéliser le Michelson par le dispositif équivalent représenté sur la Figure 4.

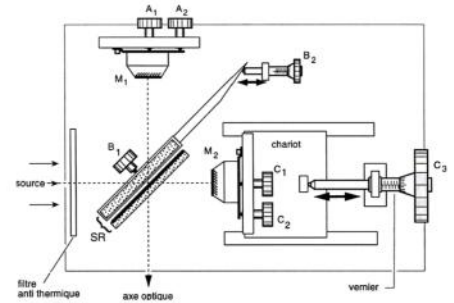


Fig. 3 Interféromètre de Michelson. On retrouve les deux miroirs ajustables M1 et M2, la séparatrice et la compensatrice ainsi que le dispositif permettant la translation du miroir M2. Figure tirée de la banque d'image.

## 2.1 lame d'air, franges d'égales inclinaison

### ■ Michelson en lame d'air

♣ Sextant

⊙ 5 min

On éclaire le Michelson avec une lampe à vapeur de sodium. On simule une source ponctuelle avec un diaphragme : les interférences sont non localisées, on les voit partout avec le même contraste, et peu intenses. Elles ont la forme d'anneaux. Lorsque le diaphragme est ouvert, on passe à une source étendue et le contraste se détériore, on dit qu'il y a brouillage du fait de la cohérence spatiale. Cette fois-ci les interférences sont localisées en l'infini, visible au foyer d'une lentille. L'intensité est nettement supérieure.

On se propose d'expliquer ces observations par une étude détaillée du dispositif.

#### 2.1.1 Localisation des interférences

On applique le théorème de localisation. On cherche le lieu d'intersection des rayons issus d'un unique rayon incident. Comme le montre la Figure 4, pour un rayon d'angle d'incidence  $i$ , les interférences sont localisées en l'infini. On peut ainsi les observer dans le plan foyer image d'une lentille convergente. On peut également remarquer la symétrie du système par rotation autour de l'axe optique, ce qui explique la forme d'anneau des interférences.

#### 2.1.2 Différence de marche

En considérant les ondes planes, l'application du théorème de Malus nous permet de montrer que

$$\delta = 2e \cos(i). \quad (5)$$

L'intensité des interférences est alors

$$I = \frac{I_{\max}}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi}{\lambda} e \cos(i) \right) \right], \quad (6)$$

où  $I_{\max}$  dépend seulement de l'intensité de l'onde incidente et du dispositif semi-réfléchissant. Comme la différence de marche ne dépend que de l'angle d'incidence  $i$ , on parle d'anneaux d'égale inclinaison.

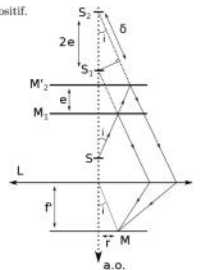


Fig. 4 Schéma équivalent du Michelson. Le point source est en S. Son image par rapport aux miroirs  $M_1$  et  $M_2$  donne deux points sources fictifs  $S_1$  et  $S_2$ .

4

**Application à la spectroscopie** La lampe spectrale à vapeur de sodium présente un doublet jaune  $\lambda_1 = 589 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 589.6 \text{ nm}$ . La présence de deux sources incohérentes modifie la figure d'interférence. L'intensité observée est donnée par

$$I = \frac{I_{\max}}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{\pi \Delta \lambda}{\lambda_0^2} 2e \cos(i) \right) \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta \right) \right), \quad (7)$$

où  $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$  et  $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ . L'interféromètre de Michelson ne permet ainsi pas de résoudre directement le doublet du sodium. On observe cependant un brouillage des interférences pour les  $e_k = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta \lambda \cos(i)} k + e^s$ . On peut alors déterminer  $\Delta \lambda$  en mesurant l'épaisseur  $e$  de la lame d'air pour plusieurs anticoincidences successives.

### ■ Observation d'une anticoincidence

♣ Sextant

⊙ 3 min

On éclaire toujours le Michelson, réglé en lame d'air, avec la lampe spectrale au sodium. On observe à nouveau les franges bien contrastées puis en chariotant on voit que le contraste varie et passe par des minimums où les franges ne sont plus visibles : c'est ce qu'on appelle anticoincidence.

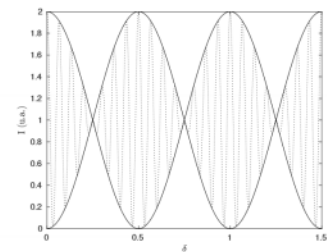


Fig. 5 En pointillé l'intensité obtenue sur le doublet du sodium. On constate que le contraste s'annule régulièrement : on observe des anticoincidence en ces points.

Étudiants à présent une seconde disposition du Michelson. On place à présent les miroirs en coin d'air.

## 2.2 Coin d'air et frange d'égale épaisseur

### 2.2.1 Localisation des franges

Appliquons une nouvelle fois le théorème de localisation des interférences. En considérant un unique rayon incident, formant un angle  $i$  avec l'axe optique, on obtient deux rayons qui se croisent au voisinage des miroirs (Figure 6). Le lieu des intersections des rayons sortants pour différentes incidence  $i$  forment un plan, nommé plan de localisation. Pour des angles d'incidence faibles, on peut confondre ce plan avec le plan formé par le miroir M1.

### 2.2.2 Franges d'égale épaisseur

Comme l'illustre la Figure 6, en incidence normale la différence de marche est

$$\delta = 2e(X) \simeq 2\alpha X, \quad (8)$$

où  $X$  désigne la coordonnée du rayon incident sur le miroir M1. La seconde égalité n'est valable que dans l'approximation d'un angle  $\alpha$  faible. Comme la différence de marche dépend seulement du point d'incidence sur le coin d'air, on parle de franges d'égale épaisseur. La symétrie par rotation autour de l'axe optique est brisée, on obtient des franges rectilignes.

Cette dépendance des interférences en l'épaisseur du coin d'air permet la mesure de l'épaisseur de lame, ou la mesure d'indices optiques.

5

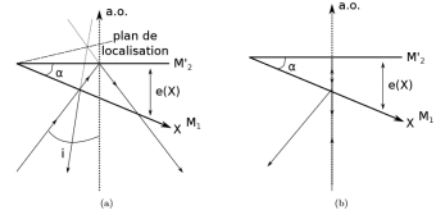


Fig. 6 Interféromètre de Michelson en coin d'air (a) en incidence quelconque et (b) en incidence normale.

Le Michelson est donc un interféromètre à division d'amplitude de grande précision. On s'affranchit des problèmes de cohérence spatiale au prix de localisation des franges, ce qui permet un net gain d'intensité sur la figure d'interférence. Il ne permet cependant pas de résoudre directement le doublet du sodium. Dans ce but, étudions un dispositif interférométrique non plus à 2 ondes mais à  $N$  ondes : le Fabry-Pérot.

### 3 Interféromètre de Fabry-Pérot

L'interféromètre de Fabry-Pérot a été inventé par deux physiciens français à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Il est composé de deux lames à faces parallèles semi-réfléchissantes que l'on considérera identiques. On note  $r$  et  $t$  leurs coefficients de réflexion et transmission en amplitude. Comme on se place toujours ici dans un milieu d'indice  $n = 1$ , il n'y a qu'un type d'interface et donc un seul coefficient de réflexion  $r$ . Les deux lames sont parallèles entre elles, si bien que le dispositif est analogue à une lame d'air. La figure d'interférence sera donc formée d'anneaux d'épaisseur inclinés localisés en l'infini. Par analogie également, la différence de marche entre deux rayons sortants successifs est  $\delta = 2e \cos(i)$ . Par la suite, on notera  $R = r^2$  et  $T = t^2$ . La marche d'un rayon à travers le système est représentée en Figure 7.

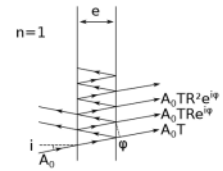


Fig. 7 Interféromètre de Fabry-Pérot. L'appareil est composé de deux lames parallèles semi-réfléchissantes séparées d'une distance  $e$ . Le faisceau incident subit de multiples réflexions avant d'être transmis. On note  $r$  (resp.  $t$ ) le coefficient de réflexion (resp. de transmission) en amplitude des lames.  $R$  et  $T$  sont les coefficients en puissance.

#### 3.1 Intensité de l'onde transmise

Les réflexions multiples créent une infinité d'ondes transmises, ce qui change grandement l'intensité transmise par rapport au cas du Michelson. Tous les rayons sont transmis deux fois d'où le facteur  $T = t^2$ . Le premier rayon sortant n'est pas réfléchi, alors que le second est réfléchi 2 fois, d'où un facteur  $R = r^2$ , et le  $n$ ème rayon l'est  $2n$  fois d'où un facteur  $R^n$ . L'amplitude de l'onde en sortie de l'interféromètre est donc

$$A = A_0 t^2 \sum_n (r^2 e^{i\phi})^n = \frac{A_0 T}{1 - R e^{i\phi}}, \quad (9)$$

où  $A_0$  est l'amplitude de l'onde incidente et  $\phi = \frac{4\pi}{\lambda}e \cos(i)$  le déphasage entre deux ondes sortantes successives. On obtient ainsi l'intensité

$$I = |A|^2 = \frac{I_0 T^2 / (1-R)^2}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{\phi}{2}}. \quad (10)$$

En notant  $I_{max} = \frac{I_0 T^2}{(1-R)^2}$  et  $M = \frac{4R}{(1-R)^2}$ , on peut réécrire

$$I = \frac{I_{max}}{1 + M \sin^2 \frac{\phi}{2}}. \quad (11)$$

Pour un coefficient  $R$  proche de 1, on obtient des interférences très contrastées (Figure 77). Les pics sont très fins et localisés autour des points d'annulation de  $\sin(\phi/2)$ . Pour  $R$  petit devant 1, on perd en contraste.

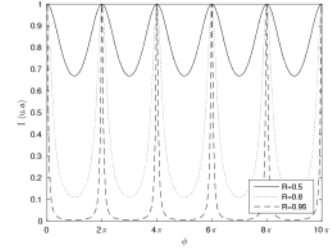


Fig. 8 Intensité transmise en fonction du déphasage  $\phi$  pour deux coefficients de réflexion des miroirs. Plus les miroirs sont réfléchissants et plus les pics sont fins.

### 3.2 Finesse et pouvoir de résolution

Dans le but de caractériser la finesse du dispositif, on définit

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\phi}{\delta\phi}, \quad (12)$$

avec  $\Delta\phi$  l'écart entre deux pics successifs et  $\delta\phi$  la largeur à mi-hauteur d'un pic. Les pics correspondent aux maxima de  $I$  sont les  $\phi = 2k\pi$ ,  $k \in \mathbb{Z}$  donc

$$\Delta\phi = 2\pi \quad (13)$$

Plaçons nous au voisinage d'un pic :  $\phi = 2k\pi + \epsilon$ ,  $\epsilon \ll 1$ . Un développement limité donne  $\sin\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \simeq (-1)^k \frac{\epsilon}{2}$ , d'où

$$I \simeq \frac{I_{max}}{1 + \frac{M\epsilon^2}{4}}. \quad (14)$$

On reconnaît une lorentzienne de largeur à mi-hauteur  $\delta\phi = \frac{4}{\sqrt{M}}$ . Ainsi,

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{M}}{2} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}. \quad (15)$$

#### Ordres de grandeur

Pour  $R=0.8$ ,  $\mathcal{F} = 14$ , et pour  $R=0.99$ ,  $\mathcal{F} = 313$ . Une faible augmentation de  $R$  permet ainsi un fort gain en finesse. On notera que la finesse des meilleures cavités Fabry-Pérot est actuellement de l'ordre de 100000. On peut également comparer cette finesse à celle qu'on pourrait définir pour le Michelson, qui serait de 2.

La grande finesse du Fabry-Pérot laisse espérer la possibilité de résoudre directement le doublet du sodium. Définissons pour cela le pouvoir de résolution du dispositif, qui quantifie sa capacité à séparer deux longueurs d'onde :

$$PR = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (16)$$

avec  $\lambda$  la longueur d'onde moyenne et  $\delta\lambda$  l'écart en longueur d'onde séparable minimal. Ici  $\delta\lambda$  est relié par le critère de Rayleigh à la largeur en longueur d'onde des pics. On obtient donc, en valeur absolue,

$$\delta\phi = \frac{2\pi}{\mathcal{F}} = \frac{4\pi e \cos(i)}{\lambda^2} \delta\lambda \quad (17)$$

donc

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2e \cos(i)\mathcal{F}} \quad (18)$$

et

$$PR = \frac{2e \cos(i)}{\lambda} \mathcal{F} = p\mathcal{F}, \quad (19)$$

où  $p$  est l'ordre d'interférence.

Pour les étalons Fabry-Pérot de la collection,  $R = 0.85$ . Une épaisseur  $e = 0.2$  mm pour le doublet du sodium  $\lambda = 589.3$  nm donne  $PR \simeq 13000$  en incidence normale. Or le pouvoir de résolution minimal pour résoudre le doublet du sodium est  $\frac{\lambda}{\delta\lambda} \simeq 1000$ . Il est donc possible de séparer le doublet du sodium à l'aide du Fabry-Pérot.

#### ■ Séparation du doublet du sodium

➤ Duffait

⊙ 3min

Le Fabry-pérot est réglé de sorte à observer deux systèmes d'interférences créés par chacun des doublets,  $e = 0.2$  mm. Deux systèmes d'anneaux concentriques sont ainsi visibles. Quelques mots sur le réglage du Fabry-Pérot : on a ici utilisé un étalon Fabry-Pérot de la collection. Il ne permet donc pas une variation continue de l'épaisseur de la lame d'air, il faut, pour chaque épaisseur, réajuster le parallélisme. Les étalons ont cependant l'avantage d'être stables, i.e. non sensibles aux chocs sur la paillasse qui, dans le cas de l'interféromètre de Fabry-Pérot, peuvent anéantir une heure de réglage. Les étalons de la collection possèdent trois vis de réglage grossier, dont une reliée à un vernier en millimètres. Il peut être pratique d'ajuster cette vis en premier lors du réglage grossier du parallélisme, afin d'avoir dès le départ une épaisseur proche de celle recherchée. On règle alors le parallélisme sans toucher cette vis.

### Conclusion

Au cours de cette leçon, nous avons montré que les interféromètres à division d'amplitude s'affranchissaient des problèmes liés à la cohérence spatiale, mais que cela se paie au prix de la localisation des interférences. Les franges sont cependant plus lumineuses et l'on peut réaliser des mesures précises de spectroscopie. Il existe d'autres interféromètres à division d'amplitude comme l'interféromètre de Mach-Zender ou celui de Sagnac. Ce dernier est utilisé dans les avions pour mesurer avec précision des vitesses de rotation.

### Questions et commentaires



## LP 34 Interférométrie à division d'amplitude

Présentation : Camille Eloy le jeudi 17 Novembre 2016

Correction : Marc VINCENT<sup>\*</sup>, Samuel PAILLAT<sup>†</sup>

Note : A

Les commentaires suivants reprennent et complètent plusieurs remarques formulées à l'issue de la présentation. Il s'agit de mises en garde et/ou de propositions sachant qu'il appartient à chacun de faire ses choix et de les assumer ensuite sur la base éventuellement de ce rapport.

### 1 Extrait des rapports de jury

Jusqu'en 2013, le titre était : Interféromètres à division d'amplitude. Exemples.

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.

2005 Le Michelson n'est souvent utilisé qu'en lame d'air. Les problèmes de localisation et les détails expérimentaux sont rarement présents, tout comme les applications. On peut, dans cette leçon, admettre que les dispositifs par division du front d'onde ont déjà été étudiés auparavant, ce qui permet au candidat d'entrer tout de suite dans le vif du sujet de la division d'amplitude et de son intérêt.

### 2 Commentaires généraux

Très bonne présentation de Camille Eloy, très claire. Les calculs étaient bien menés. Deux expériences ont été présentées au bon moment et ont été tout à fait concluantes. Avec le Michelson en configuration lame d'air, il a mis en évidence la localisation des anneaux à l'infini et a montré l'évolution du contraste dans le cas du doublet jaune du sodium. Il a aussi montré que le Fabry-Pérot permettait de résoudre ce même doublet jaune du sodium. Il n'y a eu qu'une seule fausse note avec la présentation sur transparent d'un schéma du Michelson en lame d'air incorrect. Enfin, Camille a été très à l'aise dans ses réponses aux questions permettant aux correcteurs de poser des questions plus ouvertes.

### 3 Commentaires détaillés

#### 3.1 Première partie : Localisation des interférences

Il n'y a pas de remarques particulières sur cette partie. La condition de non-brouillage pour une source étendue et le théorème de localisation ont été bien présentés de manière à introduire l'utilité des interféromètres à division d'amplitude. Il faut quand même rappeler rapidement les notions de cohérence spatiale et temporelle et bien préciser qu'on utilise le modèle scalaire de la lumière, soit avec des ondes non-polarisées (lumière blanche, ...) ou des ondes polarisées dans des directions non orthogonales.

<sup>\*</sup>marc.vincent@ac-lyon.fr

<sup>†</sup>samuel.paillat@ems-lyon.fr



### 3.2 Deuxième partie : Interféromètre de Michelson

Après une présentation du Michelson, Camille a très bien montré expérimentalement qu'avec l'élargissement de la source en configuration lame d'air on perd le contraste de la figure d'interférence mais qu'on le retrouve en éloignant l'écran. L'insertion d'une lentille pour observer la figure contrastée dans son plan focal a été très concluante. Dans cette partie, Camille a été réactif pour modifier ses réglages alors que la première figure était assez floue, ce qui a permis de faire ensuite de très bonnes observations. Par contre, le schéma du Michelson en lame d'air était faux. Lorsqu'on s'en rend compte pendant la leçon, il faut le préciser et ne pas l'utiliser plutôt de continuer comme s'il était juste.

Enfin, pour la configuration en coin d'air, Camille a juste présenté la localisation des franges et fait le calcul de la différence de marche sans expériences ni applications mais il a ensuite bien répondu aux questions sur ce sujet.

### 3.3 Interféromètre de Fabry-Pérot

Le calcul de la figure d'interférence en sortie d'un Fabry-Pérot a été très bien faite ainsi que le calcul de sa finesse et de son pouvoir de résolution. L'observation des deux systèmes d'anneaux dans le cas du doublet jaune du sodium en fin de leçon était très réussie.

## 4 Questions du jury

- Pouvez préciser les notions de cohérence spatiale et temporelle ?
- Donnez la définition du contraste.
- Est-ce qu'il est important que la lame séparatrice soit semi-réfléchissante ?
- Que se passe-t-il si les amplitudes des pics correspondant au doublet jaune du sodium ne sont pas égales ?
- Est-ce que l'on peut retrouver la largeur d'un pic du doublet jaune du sodium avec le Michelson ?
- Comment observe-t-on la figure d'interférence en configuration coin d'air ? Quelles sont les applications du Michelson dans cette configuration ?
- Quelle est la différence entre la figure d'interférence obtenue avec un Fabry-Pérot et celle obtenue avec un réseau ?
- Est-il pertinent de parler de finesse dans le cas du Michelson ?
- Qu'est-ce que l'effet Sagnac ?
- Pouvez-vous présenter l'interféromètre VIRGO ?
- Est-ce qu'il existe pour les atomes l'équivalent de lames semi-réfléchissantes permettant de faire un interféromètre à division d'amplitude ?

## 5 Conclusion

C'est une leçon où les phénomènes présentés sont bien connus et le plan de la leçon est souvent classique. Il faut alors montrer une grande maîtrise dans les calculs et dans les manipulations expérimentales, ce qui a été le cas dans cette présentation. Le temps a été bien respecté. Une manière de varier un peu serait de présenter la figure d'interférence en configuration coin d'air mais cela implique de diminuer la première partie qui permet néanmoins de bien justifier l'utilité des interféromètres à division d'amplitude.

# LP19. Diffraction de Fraunhofer.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Pearson PC 2eme année ancienne version  
Cours optique montrouge

## Manip:

- Mesure d'une épaisseur
- Critère de Rayleigh
- Filtrage: faire avec un laser un peu épuré,

Introduire la diffraction comme limite de l'optique géométrique en présentant la manip de diffraction d'un laser sur une fente sans rien comme ça... c'est inexplicable !

## Expérience

Éclairer une fente par un laser, observer l'image à grande distance, réduire la largeur de la fente : on observe un comportement non prédit par l'optique géométrique...

1. Au-delà de l'optique géométrique: diffraction
  - a. Principe d'Huygens-Fresnel
  - b. Diffraction de Fraunhofer (MANIP: mesure de l'épaisseur d'un cheveu)
  - c. Théorème de Babinet (transition, la figure d'intro et du cheveu est la même ! Pourquoi ? Babinet)
2. Application, limitation
  - a. Filtrage optique (MANIP QUALI détramage genre)
  - b. Critère de Rayleigh (MANIP: quanti si le temps si non quali sur caliens)e

Filtrage trop compliqué de le montrer pour des L2

Intro: Présenter la diffraction de manière très générale (optique (mise en évidence avec une fente réglable) et ou mécanique avec la cuve à onde, plus visuelle)

1. Modèle de la diffraction
  - a. Principe d'Huygens-Fresnel
  - b. Diaphragme et approximation de Fraunhofer  
Pour le calcul soit dans le Péréz, soit dans Ondes lumineuses, bien préciser l'approximation (la longue distance ne suffit pas)
2. Illustrations et limitations
  - a. Exemple de la fente rectangulaire et mesures de largeur  
Calcul: bien introduire et tracer le sinc  
Manip: Présenter le concept, image de la figure de diffraction, fitter un sinc dire ok on a la bonne forme c'est cool on peut regarder du coup les premiers zéro (bien préciser que la tache centrale est deux fois plus large), calibration avec largeur de fente, mesure d'épaisseur, on peut changer de longueur d'onde aussi)
  - b. Autres formes de diaphragme
  - c. Observations et critères de Rayleigh (cosmologie jean yves daniel, très belle illustration)
3. Application au filtrage

## LP20. Diffraction par des structures périodiques.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Niveau: L3

Prérequis:

- Optique ondulatoire (diffraction de fraunhofer)
- TF
- Dualité onde-corpuscule

Insister sur la réciprocité des phénomènes: on peut se servir du réseau pour obtenir des infos sur la source spectrale, ou se servir de la source spectrale pour avoir des infos sur le réseau !

Maths:

- Démontrer la formule des réseaux
- Démontrer le truc Facteur de forme\*facteur de structure ?

Manip:

- Loi de Bragg, diffraction électron
- Réseau
- Spectro ?

Réseau: marche nickel, prendre un 600 trait, se mettre loin

### 1. Diffraction par une structure périodique 2D: le réseau

Ici on présente le phénomène, et on applique ça à l'étude spectrale

- a. Formules fondamentales (MANIP quanti: retrouver une relation linéaire entre  $\sin(\theta)$  et  $\lambda$  pour une lampe spectrale de raie connues (sextant))
- b. Exemple d'utilisation: la spectroscopie (MANIP quali !: spectro d'une source connu pour calibrer, puis inconnue)
- c. Finesse d'un réseau (MANIP: voir marchetti, avec un laser et un spectro, angle en fonction du nombre de trait), on peut présenter le dispositif en même temps que la théorie, et pas faire la manip, limite du réseau, comparaison avec d'autres dispositif genre FP...

### 2. Diffraction par une structure périodique 3D: les cristaux

On connaît précisément la longueur d'onde ici, et on remonte à la structure périodique !

- a. Loi de Bragg
- b. Dualité Onde-corpuscule (rappel lycée) paf les électrons pour range d'énergie !
- c. MANIP quanti diffraction des électrons sur poudre de graphite

# LP21. Absorption et émission de la lumière.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Niveau: L2

Prérequis:

-

Ref: Roussille pour corps noir.

Dunod pour planck donnée

Cours MQ pierre

Effet photoélectrique mesure de  $h$

1. Rayonnement du corps noir
  - a. MANIP fil
  - b. Modèle
  - c. Soleil
2. D'où viennent les raies noires ?
  - a. Modèle de l'atome quantique
  - b. Emission spectrale: Série de Balmer, ... MANIP constante de rydberg
  - c. Absorption spectrale: émission stimulée
3. Absorption et semiconducteur
  - a. Principe de la CCD
  - b. Photodiode ?

Manip:

Photodiode

Lampe spectrale

# LP22. Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Manip:

- Mesure de l'aimantation d'un ferro avec une balance et bobine de Helmholtz (Jolidon)
- Montrer cycle hystérésis (+ première aimantation) prendre les trucs en boîte si on veut les data constructeurs
  - o Pour le cycle se placer à assez haute tension (quelques Volts), prendre la ferrite-nickel (fer doux moins joli, acier dur on peut pas saturer le  $H_c$  est de l'ordre de  $1e4$ ) bien faire la raz, on peut quantitativement avoir les pertes fer avec l'aire du cycle et  $H_c$ ,  $B_r$
  - o Pour la première aimantation remplacer le GBF par une alim continue et sweep (bien inverser les bornes pour sweep négatif)
- Montrer les domaines de Weiss
- Curie ?

1. Généralité sur le ferromagnétisme à l'échelle macroscopique
  - a. Définition
  - b. Courbe de première aimantation et cycle (MANIP QUALI)
  - c. Ferromagnétisme doux/dur; notion énergétique et perte fer (MANIP ?)
  - d. Mesure de l'aimantation (MANIP QUANTI)
2. Applications
  - a. Électroaimant
  - b. Transformateur
  - c. Disque dur
3. Origine microscopique et conséquence macroscopique
  - a. Dev phystat de ferro avec tanh et tout pour arriver à curie
  - b. Mise en évidence des domaines de Weiss

# LP23. Mécanismes de la conduction électrique dans les solides.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Niveau: L3

Contexte: cours de physique du solide débutant

Prérequis: -Phy stat  
-Méca Q

Objectifs: Décrire la conduction électrique à l'échelle microscopique

Maths: démo drude, démo sommerfeld/ bande, démo effet Hall

Ressources:

- Solid State Basics Simmons
- Kittel
- Ascroft
- Mangin et Kahn
- Leçon de physique
- Littéralement tout dans le Sacuto

1. Description classique: Modèle de Drude
  - a. PFD
  - b. Dépendance en température (MANIP 4 fils en T ?)
  - c. Effet Hall (mesure de Hall ??)
  - d. Cas particulier: la supraconductivité (présenter le modèle de London simplement)
2. Modèle semi-classique: mer de Fermi
  - a. Théorie des bandes
  - b. Niveau de Fermi
  - c. Conducteurs/Isolants/Semiconducteur (MANIP: Cuivre vs Germanium en densité de porteur ?)

À écrire complètement !

## LP24. Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Manip:  
Oscillateur couplés

- Bien éloigner la VideoCam pour bien voir les 4 masses
- Pour l'excitation, prendre pot vibrant p99,42/3
- Ampli 47,7/1
- GBF
- Fixer une tige au bout du pot, relier une masse et la tige via un ressort assez souple pour pas forcer la masse
- Mesurer les fréquences des modes propres en envoyant un bruit blanc (bandwidth autour de 20Hz, autour de 3V d'amplitude) mesurer longtemps pour avoir une bonne résolution fréquentiel
- Exciter les modes à basse amplitude (résonance !) avec les fréquences mesurées, et c'est beau !

Niveau L2: bien vendre ça en mode, vous avez vu plein de choses en physique déjà, là on va revisiter certaines choses et essayer de prendre du recul

Prérequis: OH en méca, électrocinétique de base, bases optiques (géo + interférence)

Ref: Leçon de physique

1. Oscillateur harmonique forcé
    - a. Présentation du problème
    - b. Résonance en position (manip résonance en tension)
    - c. Résonance en vitesse (script résonance en intensité)
    - d. Généralisation avec l'exemple du RLC série (faire la manip en tension, et montrer le code en intensité)
  2. Généralisation des phénomènes résonants
    - a. Possibilité de multiples fréquences de résonances (systèmes couplés) (illustration qualitative avec la manip)
    - b. Infinités de fréquences de résonances (ondes stationnaires) (illustration avec melde ou kundt)
    - c. Extension aux cavités (de manière générale existence de condition limites = résonances comme en optique) (illustration avec Fabry-Pérot)
1. Généralités sur les phénomènes résonants
    - a. Nuance résonance/fréquence propre
    - b. Réponse indicielle et impulsionnelle (MANIP: avec démo de diagramme de Bode en manip direct)
    - c. Portrait de phase
  2. Électronique: RLC
    - a. Résonance en tension (manip, attention impédance du GBF) (programme dans ./Montrouge/rlc\_serie\_force)
    - b. Résonance en intensité (script python dans ./Lyon)
  3. Mécanique
    - a. Oscillateur couplés
    - b. Melde
  4. Résonances optique
    - a. Cavité LASER
    - b. Cavité Fabry-Pérot

# LP25. Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités.

jeudi 20 mars 2025 09:11

Manip:  
Oscillateurs couplés  
Borda

Bibilo: Roussille  
Prépa 1ère année  
Jolidon  
Fruchart  
Krob

Double puit:  
- Bien suivre le Jolidon  
- Bien faire les offsets à l'oscillo  
- Pour le portrait de phase: signal triangle de faible amplitude (1Vpp) faible fréquence  
- Jouer de l'offset de l'ALI3 si besoin pour faire tomber dans un ou l'autre puit

Niveau L3  
Prérequis: Oscillateurs harmoniques + amorti  
Mécanique du point  
Électrocinétique  
Notions de physique du solide (Température de Curie)  
Pendule pesant

Intro:  
Dire en gros que les OH sont des systèmes connus, maîtrisés, qu'on va les revisiter en toute généralités, en utilisant les outils qu'ils maîtrisent qu'ils n'avaient pas en première année (TF, Heaviside...)  
C'est des systèmes essentiels en physique.

Reprendre le roussille, parler des OH, c'est un peu un rappel, qui met en exergue les analogies entre OH vu par le passé

1. Universalité des oscillateurs harmoniques
  - a. Rappel sur OH et amortissement
  - b. Portrait de phase  
Roussille
2. Mise en évidence des non-linéarités:
  - a. Présentation du pendule pesant: du régime linéaire au régime non linéaire
  - b. MANIP BORDA, lancer la manip et les oscillations, et laisser tourner pendant le reste du cours et se servir de l'illustration comme support
  - c. Démo Borda
  - d. Retour sur la manip pour quanti  
Roussille + poly TP divers
3. Les différents rôles des non-linéarités
  - a. Oscillateur quasi-sinusoidal: Wien  
Hprépa, Dunod, Précis... tout PSI
  - b. Oscillations auto entretenues: Van der Pol, compétition résonance/dissipation  
Idem, ou Roussille, ou Principe l'électronique Bates  
physique par la pratique portelli

Conclusion:

Ouvrir sur double puit ?

On a vu plusieurs systèmes et on a utilisé le même outil pour les étudier: le portrait de phase, cette démarche s'inscrit dans une étude plus globale de systèmes complexes, appelé système dynamique, que vous verrez en M1 très probablement. L'objectif de ce cours était de faire un sum up de la physique vue en licence, tout en introduisant les outils pour la suite.

VDP dans la physique par la pratique portelli

1. Introductions à la physique des systèmes dynamiques: bifurcation fourche
  - a. Oscillateur double puit
  - b. En méca
  - c. En élec + manip
  - d. Lien avec la méca q ou Curie, ou tout système du genre



# LP26. Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley.

jeudi 20 mars 2025 09:11

## Manip:

- Chaîne solitons
- Michelson ?

## Prérequis:

- ARQS
- Mécanique
- EM

## Niveau: L3

## Biblio:

- Roussille
- Intro à la relat restreinte Hladik
- Intro à la relat Langlois
- Relat restreinte Semay (paradoxe des jumeaux dedans)

### 1. De la nécessité de la relativité

- a. Incompatibilité de la mécanique et de l'électromagnétisme: Transformation de Galilée sur  $E$  et  $B$  (retour ARQS) Cours EM ENS pdf
- b. Expérience de Michelson et Morley (parler de l'éther et de l'invariance de  $c$ )  
Calculs et manip décrite précisément dans Roussille, se servir d'un vrai michelson pour illustrer qu'une petite variation de longueur et pouf pas d'interférence pour la sensibilité (MANIP QUALI)
- c. Naissance de la relativité restreinte: postulats d'Einstein  
Roussille c'était bien fait, voir pdf cours pour les détails

### 2. Conséquences et cinématique relativiste

- a. Référentiels en relativité restreinte (définir événement et temps propre)
- b. Transformation de Lorentz (démon ?) donner le cas spécial
- c. Contraction et dilatation
- d. Distance entre événements (donner  $ds$ , donner genre espace-temps, diagramme espace-temps)

### 3. Concrètement

- a. Effet Doppler-Fizeau (application à la cosmo)  
Calcul dans Roussille, ou Langlois
- b. Durée de vie des muons (expérience de Bertozzi)  
Roussille ou pdf de cours

# LP27. Effet tunnel : application à la radioactivité alpha.

jeudi 20 mars 2025 09:11

## Manip:

- Animation Saclay: effet tunel.py
- Lyon ou Saclay: NH3.py

## Prérequis:

- Electromagnétisme
- Mécanique

Niveau L3

## Ressources:

- Livre de Mayet de physique nucléaire (Modèle de Gamov)
- Calculs états stationnaires (Ngo Physique Quantique introduction)
- Roussille (Schrodi + Modèle de Gamov +++)

[Quantum Tunnelling in Radioactive Decay](#)



1. Intro à la mécanique quantique
2. Schrod: Puit infini
3. Puit fini et exo alpha

### 1. Mécanique ondulatoire

- a. Un objet physique important: le paquet d'onde
- b. Évolution temporelle: Équation de Schrodinger
- c. Comment traiter un exercice ? Exemple du puit infini

### 2. Exemples de potentiels

- a. Puit fini: Radioactivité alpha
- b. Barrière finie: STM et MASER

### 1. Accroche par la dualité onde corpuscule: diffraction/interférences des électrons

### 2. Élément de mécanique quantique

- a. Notion de paquet d'onde
- b. Évolution temporelle

### 3. Cas stationnaire

- a. Puit infini
  - Calcul de base dans le Ngo
- b. Modèle de Gamov et effet tunnel
  - Bien détaillé dans le Roussille, Mayet pour ODG

# Ressources

25 May 2025 15:06

<https://perso.crans.org/sylvainrey/>

<https://perso.ens-lyon.fr/fabrice.fourcade/Leçons/>

<https://ggastebois.fr/java/index.htm>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Montages\\_de\\_base\\_de\\_l'amplificateur\\_op%C3%A9rationnel](https://fr.wikipedia.org/wiki/Montages_de_base_de_l'amplificateur_op%C3%A9rationnel)

Leçons de physique Pérez Lagoute Pujol Desmeubles: Très général beaucoup de choses dedans

La physique quantique et ses applications Basdevant

Physique MP PT cap prépa renvoisé paulin

Simulations sympa <https://femto-physique.fr/simulations/simple-pendulum.php>  
(ici pour pendule portrait de phase)

[https://www.physagreg.fr/lecon\\_agreg.php](https://www.physagreg.fr/lecon_agreg.php)

<http://olivier.granier.free.fr/MOOC/co/ex-X-3-optique.html>

<https://www.etienne-thibierge.fr/agreg.php>

<https://marchettibenjamin.wordpress.com/agregation/>

<https://www.lkb.fr/rydbergatoms/teaching/teachings-clement-sayrin/>



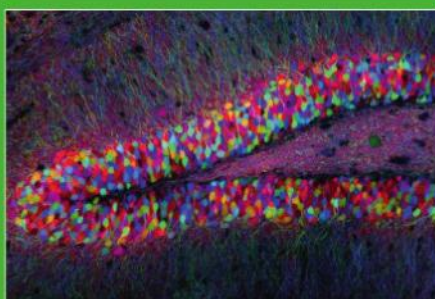
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

# IMAGER L'INVISIBLE AVEC LA LUMIÈRE ●

COMMENT L'OPTIQUE  
MODERNE RÉVOLUTIONNE  
L'IMAGERIE DU VIVANT



●  
SYLVAIN GIGAN  
ET CATHIE VENTALON,  
COORD.