

1 LP01 Gravitation

Niveau :

CPGE

Prérequis :

- Cinématique du point
- Théorèmes de la dynamique
- Électrostatique.

Objectif de la leçon : Formaliser l'interaction gravitationnelle et étudier le mouvement d'une particule massique dans un champ de pesanteur.

Bibliographie

- Page Wikipedia sur la constante gravitationnelle pour la mesure de G ;
- [29] chapitre 13
- [16]
- [39]
- [7]

Revoir [29] p472 pour des rappels d'odg sur le système solaire. Pour ce qui est du niveau : plutôt première année sauf l'analogie avec l'électrostatique qui ne peut être réalisée qu'en deuxième année.

Introduction

La gravitation décrit l'interaction entre des objets de masse non nulle. Il s'agit d'une des quatre interactions fondamentales.

Les quatre interactions fondamentales.

Elle est de loin la plus faible mais régit l'évolution des astres, ce qui s'explique par la neutralité de la matière et la longue portée des interactions considérées.

Plusieurs modèles des interactions gravitationnelles dans le but d'expliquer le mouvement des objets massifs et notamment celui des astres.

Plusieurs théories de la gravitation. Dire que la théorie de Newton marche très bien dans le cas des masses faibles (incluant le Soleil, ou presque !).

Nous allons décrire dans un premier l'interaction gravitationnelle dans le cadre de la mécanique newtonienne.

1.1 Interaction gravitationnelle

1.1.1 Force et énergie

Justifier la forme de l'interaction proposée par Newton [16]p146. Décrire la force gravitationnelle [29] p337 et [39] p569 : à distance, point d'application, attractive, expression. Principe des actions réciproques. Parler de G : valeur et mesure [16] p148. Introduire le champ gravitationnel [39] p569.

Faire apparaître l'énergie potentielle gravitationnelle en calculant le travail de la force gravitationnelle [39] p622. Définition d'une force conservatrice.

On remarque une grande similitude entre la force gravitationnelle et l'interaction coulombienne. Peut-on faire un parallèle entre la gravitation et l'électrostatique ?

1.1.2 Champ gravitationnel

Dresser le parallèle entre la gravitation et l'électrostatique :

- écrire les forces ;
- montrer les quantités analogues ($m \leftrightarrow q$, $1/4\pi\epsilon_0 \leftrightarrow -G$) ;
- analogie entre \mathcal{G} et E .

Attention au signe moins devant G !

Écrire le théorème de Gauss gravitationnel [16] p149. Calculer le champ pour une distribution sphérique de masse volumique uniforme et la tracer en insistant sur les symétries. Insister sur le fait qu'en dehors de la sphère tout se passe comme si toute la masse était concentrée sur le centre de la sphère. Théorème de superposition. Faire l'application numérique pour retrouver l'accélération de pesanteur terrestre.

Le rotationnel de $\vec{\mathcal{G}}$ étant nul, on peut aussi définir un potentiel gravitationnel pour le calcul de l'énergie gravitationnelle.

Mesure de g d'après la période d'oscillation d'un pendule simple. Lors des TP de préparation, faire le calcul avec le pendule pesant pour voir si ça améliore la sensibilité. Plusieurs façons de d'exprimer T : $\sqrt{l/g}$, Borda, intégration. On pourrait aussi mesurer l'accélération d'une masse en chute libre par analyse d'une vidéo.

Limites du parallèle :

- force toujours attractive ;
- pas de masse négative ;
- pas de champ magnétogravitationnel (en fait si mais compliqué [26], mentionner les ondes gravitationnelles).

Historiquement, les lois de la gravitation ont été établies pour expliquer les observations astronomiques concernant le mouvement des astres dans le système solaire.

1.2 Mouvement dans un champ gravitationnel

Suivre [29] à partir de p454. Objectif : étudier le mouvement d'une particule massique dans un champ de pesanteur Mentionner les trois lois de Kepler et formuler la première : [29] p460. On va vérifier cette loi et les autres.

1.2.1 Position du problème

On s'intéresse plus particulièrement au mouvement d'une masse ponctuelle autour d'une autre beaucoup plus massive (Terre-Soleil par exemple : le Soleil est fixe). Position du problème :

- justifier l'approximation de masse ponctuelle ;
- faire un schéma ;
- référentiel [39] p562 ;
- bilan des forces, pas de frottements ;
- PFD et montrer la conservation de la quantité de mouvement du barycentre ;
- un mot sur le mobile fictif pour la généralisation du problème.

C'est un mouvement à force centrale dans un champ newtonien (en $1/r^2$).

L'obtention de l'équation de la trajectoire elliptique n'est pas au programme en PCSI mais elle l'est en MPSI où ils utilisent explicitement les coniques. La démonstration passe soit par les formules de Binet avec le changement de variable $u = 1/r$ où par l'invariant de Runge-Lenz (cf Tout en un MPSI Dunod).

Le mobile fictif n'est plus au programme mais si besoin, il est bien fait dans [7] p128.

Dans ce cadre, étudions le mouvement d'une particule massique dans un champ de gravité.

1.2.2 Conservation du moment cinétique

Établir la conservation du moment cinétique et en déduire :

- la planéité du mouvement : dans le plan défini par le vecteur vitesse et la force ce qui justifie l'utilisation de coordonnées polaires ;
- la constante des aires ;
- la vitesse aréolaire et donc la loi des aires.

Formuler la 2ème loi de Kepler : « le rayon Soleil-planète balaie des aires égales pendant des intervalles de temps égaux ».

Vitesse aréolaire. Développer le cas circulaire et elliptique et montrer les étoiles au centre de la voie lactée orbitant autour de Sagittarius A : simulation ou timelapse. On l'a illustré dans le cas particulier de trajectoires elliptiques mais c'est aussi valable dans le cas général

La forme des trajectoires est-elle toujours elliptique ?

1.2.3 Conservation de l'énergie

Introduire le potentiel effectif en éliminant $\dot{\theta}$ avec la constante des aires et le tracer en faisant apparaître les deux contributions. Problème à un ddl [7] p124.

Faire apparaître les trois régimes avec le nom des trajectoires. Retour sur la première loi de Kepler qui est un cas particulier.

On souhaite connaître la période des trajectoires fermées.

1.2.4 Période du mouvement

Dans le cas circulaire, établir l'expression de la vitesse de l'orbite et donner la période du mouvement. Faire l'application numérique avec la station spatiale internationale et les dires de Thomas Pesquier ($T = 92,69$ min, cf notebook).

Généraliser aux trajectoires elliptiques pour donner et donner la troisième loi de Kepler [29] p463.

Vérification de la troisième loi de Kepler.

Nous avons bien retrouvé les loi empiriques de Kepler avec l'interaction gravitationnelle proposée par Einstein. Voyons quelques cas particuliers

1.3 Applications et limite

Toujours dans [29].

1.3.1 Vitesses cosmiques

Surtout parler de la vitesse de libération et évoquer les trous noirs.

1.3.2 Orbite géostationnaire

Faire les calculs après avoir fait le raisonnement pour montrer qu'elle est unique. Il y a actuellement environ 300 satellites sur l'orbite, soit un tous les 900 km.

1.3.3 Vers des masses non-ponctuelles

[41] p212 pour la non verticalité de \vec{g} .

Effets de marée, synchronisation des orbites, etc.

Conclusion

La dernière section peut largement être mise en conclusion si le temps vient à manquer...

Ouvrir vaguement sur la RG avec le retour sur le cas de Mercure dans l'article d'Einstein [16] p165.

2 LP02 Lois de conservation en dynamique

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

— [23] Chapitre II

Introduction

2.1 Template

2.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

3 LP03 Notion de viscosité d'un fluide. Écoulement visqueux

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

3.1 Template

3.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

4 LP04 Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

4.1 Template

4.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

5 LP05 Phénomènes interfaciaux impliquant des liquides

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

5.1 Template

5.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

6 LP06 Premier principe de la thermodynamique

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

6.1 Template

6.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

7 LP07 Transitions de phase

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

7.1 Template

7.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

8 LP08 Phénomènes de transport

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

8.1 Template

8.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

9 LP09 Conversion de puissance électromécanique

Niveau :

CPGE (PSI)

Prérequis :

- Induction
- Force de Laplace
- Énergie électromagnétique
- Électrocinétique
- Notion de couple, puissance mécanique

Objectif de la leçon : Aborder la conversion réciproque d'énergie électromécanique par l'intermédiaire de l'énergie magnétique et mettre en évidence le rôle des ferromagnétiques.

Bibliographie

En gros : Polycopié de Jérémy et Dunod PSI (apparemment la dernière édition est la meilleure)

- [17]
- [39]
- [34]
- [11]
- [1]

Dans cette leçon le jury attend explicitement une approche énergétique pour le calcul du couple du moteur qui permet de mettre en avant le rôle de l'énergie magnétique. Cela n'empêche pas de faire l'approche avec le moment magnétique que je trouve plus parlante. Le rôle du milieu ferromagnétique doit être mis en avant : canalisation parfaite des lignes de champ et \vec{B} radial dans l'entrefer dans le cas idéal permettant un recouvrement parfait entre les champs statoriques et rotoriques. J'imagine qu'on peut alors discuter des pertes si le temps le permet : avoir en tête les pertes de flux, par hystérésis, courants de Foucault, effet Joule et les façons de les diminuer. Comme dans l'induction, il faut faire attention aux conventions.

Introduction

Électricité à la base de notre société : permet de transporter de l'énergie qu'il faut convertir en lumière, chaleur ou travail. Les moteurs et générateurs sont des exemples de machines tournantes très fréquemment rencontrés depuis la production électrique jusqu'aux moyens de transport. Ces machines sont constituées d'un stator et d'un rotor (définir).

9.1 Induction et force de Laplace

Ne pas faire cette partie probablement par manque de temps et redondance avec le moteur continu. Je l'ai écrite pour rien ??? Oui sans doute...

On peut probablement la faire rapidement mais en insistant lourdement sur la correspondance entre énergie méca et elec.

On s'intéresse à une barre en mouvement dans un champ magnétique uniforme. On trouve :

$$e = lBv \quad (1)$$

Explication physique : l'opérateur met en mouvement les particules chargées du conducteur qui sont déviées par le champ magnétique. On peut alors assimiler cet effet à une force électromotrice e .

La puissance électrique est donnée par

$$\mathcal{P}_e = ilBv \quad (2)$$

Ici un déplacement crée une force électromotrice, mais on sait qu'un champ magnétique variable en crée aussi ce qui est important dans les machines électromécaniques : soit un conducteur se déplace dans un champ magnétique soit le champ magnétique est variable. Faire le schéma équivalent électrique.

Si l'induction transforme l'énergie mécanique en énergie électromagnétique, la force de Laplace fait l'inverse.

Seule la force de Laplace est à prendre en compte :

$$F_L = -ilB \quad (3)$$

dont la puissance est

$$\mathcal{P}_L = -ilBv \quad (4)$$

On montre immédiatement l'égalité entre les puissances d'induction et de Laplace ce qui est l'essentiel de la conversion électromécanique.

On peut partir du résultat $\mathcal{P}_L + \mathcal{P}_e = 0$ pour les considérations énergétiques dans le cas où la partie n'est pas traitée.

Il existe des applications où l'on souhaite faire des translations mais souvent une rotation plus utile.

9.2 Machine à courant continu

9.2.1 Cas d'une spire – Laplace

Suivre le cours de Jérémy

Modèle de la machine à courant continu.

Couple de la machine à courant continu.

On a un circuit mobile dans un champ magnétique constant ce qui conduit au phénomène d'induction.

9.2.2 Cas d'une spire – Induction de Lorentz

Retrouver l'égalité des puissances mécanique (Laplace) et de l'induction en fonction du couple, de la vitesse de rotation, de la force électromotrice et du courant.

Dire un mot sur la réversibilité de ces machines mais sera développé après.

Le couple d'un tel système n'est pas acceptable, il faut utiliser plusieurs spires et des matériaux ferromagnétiques pour optimiser le couplage entre les champs rotoriques et statoriques.

9.2.3 Généralisation aux machines réelles

Machine à courant continu réelle

Introduire la constante de couplage électromécanique et établir l'expression de la vitesse de rotation en fonction de la force contre électromotrice. Insister sur le fait que les moteurs CC sont facilement contrôlables (vitesse, piles).

Caractéristique $\omega(E)$ du moteur à courant continu.

Ces machines sont essentielles mais présentent des inconvénients :

- pour la production : le transport d'électricité en CC n'est pas rentable, il vaut mieux utiliser le triphasé.
- pour les moteurs : contacts glissants qui s'abîment, puissances modérées.

9.2.4 Machine synchrone

Avant on avait un moment magnétique variable dans un champ magnétique permanent, maintenant on va voir un moment magnétique constant dans un champ magnétique variable

9.2.5 Création d'un champ tournant

Faire le cas avec un champ diphasé pour avoir l'idée puis montrer le cas réel avec 3 bobines.

On peut raisonner par analogie avec les polarisations circulaires qui se décomposent en somme de polarisation linéaires.

Création d'un champ tournant.

En plaçant un dipôle au centre, celui-ci sera soumis à un couple qui peut le mettre en rotation.

Boussole dans un champ magnétique tournant.

En pratique les champs obtenus grâce à de simples spires n'est pas très intense et le couplage entre les champs statorique et rotorique n'est pas optimal. Il faut utiliser un milieu ferromagnétique doux pour canaliser le champ magnétique.

9.2.6 Champ statorique

Modèle de la machine synchrone. Parler des hypothèses et insister sur le rôle du matériau ferromagnétique.

Champ statorique.

Calculer le champ statorique avec le théorème d'Ampère dans les milieux comme dans le bouquin de PSI en faisant attention à bien justifier les symétries, etc.

Aboutir sur l'expression du champ glissant (la donner par analogie avec la partie 9.2.5 si manque de temps).

Donner l'expression du champ rotorique par analogie avec le cas d'une seule spire.

9.3 Couple de la machine synchrone

Suivre le livre de PSI pour déterminer l'expression de l'énergie électromagnétique dans l'entrefer et en déduire l'expression du couple. Faire apparaître la condition de synchronisme puis discuter des différents régimes de fonctionnement.

Caractéristique $\Gamma(\alpha)$

Faire un bilan de puissance comme dans le poly de Jérémie et insister sur les conventions.

Discuter des avantages et inconvénients de la machine synchrone (ouvrir sur les problèmes liés au démarrage et éventuellement montrer la cage d'écuréuil)

Conclusion

Faire un bilan de puissance avec les systèmes mécanique et électrique et montrer le couplage entre les deux par l'induction et la force de Laplace. Parler des pertes si cela n'a pas été fait dans la leçon.

10 LP10 Induction électromagnétique

Niveau :

Licence

Prérequis :

- Electrocinétique
- Forces de Laplace
- Equations de Maxwell
- Potentiels

Objectif de la leçon : Comprendre l'origine physique de l'induction et quantifier ses effets. Les illustrer à travers plusieurs applications.

Bibliographie

- [37]
- [41]
- [33]
- [5]

Dans cette leçon, il faut faire particulièrement attention à insister sur l'importance du choix des conventions d'orientation et les respecter. L'introduction de la fem d'induction est délicate : avoir en tête les différentes approches possibles (empirique, modèle de Drude et force de Lorentz, changement de référentiel) et être prêt à défendre ses choix. Les aspects énergétiques sont importants.

Introduction

Qu'est ce que l'induction ?

En approchant un aimant d'une bobine, on constate l'apparition d'un courant. C'est l'induction : à partir d'un champ \vec{B} on peut créer un courant dans un conducteur.

Expérience historique de Faraday (1831) dans laquelle il observe le courant dans une bobine créé par une autre bobine alimentée par une pile. Il pensait que le courant été créé par un champ magnétique, mais c'est en allumant la bobine qu'on observe effectivement un courant : il faut une variation du champ \vec{B} .

On observe l'apparition de courant quand l'aimant se déplace dans la bobine. En revanche, il n'y a pas de courant quand \vec{B} est statique.

On va essayer de quantifier cet effet.

10.1 Les lois de l'induction

10.1.1 La loi de Faraday 2'30

Relire le début du poly de Jérémy sur les moteurs pour l'introduction de la fem.

Dans le cadre de l'ARQS, on s'intéresse à un contour fermé $ABCD$ placé dans un champ magnétique \vec{B} et on donne une vitesse \vec{v} au circuit. On calcule la force de Lorentz qui s'applique aux porteurs de charge du circuit

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}). \quad (5)$$

La démonstration est faite dans [37]. On en déduit la force électromotrice qui correspond au travail de la force de Lorentz divisé par q . On utilise les potentiels scalaire et vecteur pour réécrire E . Le terme en $\vec{\text{grad}}V$ est nul car le contour fermé. Avec le théorème de Stokes-Ampère, on transforme l'intégrale sur $d\vec{A}/dt...$ En intégrant sur tout le circuit, on obtient finalement

$$e = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} + \int (\vec{v} \wedge \vec{B}) d\vec{l} \quad (6)$$

Cette expression fait apparaître les deux termes de l'induction :

- Neumann, associé à une variation temporelle de \vec{B} ;
- Lorentz, associé à un déplacement du circuit dans un champ magnétique non uniforme.

Dans le cas d'un circuit indéformable, on retrouve la loi de Faraday, qui fait intervenir la dérivée totale du flux :

$$e = - \frac{D\Phi}{Dt} \quad (7)$$

Plutôt que d'établir cette formule il est sans doute préférable d'étudier les cas particuliers utiles pour la leçon :

- induction de Neumann : se contenter d'un circuit fixe et indéformable dans un champ magnétique variable. Eventuellement parler des flux coupés pour la généralisation de cette loi qui est la loi empirique. Insister sur la convention d'orientation.
- induction de Lorentz : garder le terme $\vec{v} \wedge \vec{B}$.

Le signe moins de la loi de Faraday est très important. Il indique que l'induction va créer un courant dont le sens s'oppose à sa cause (le champ magnétique créé par ce courant tend à s'opposer à la variation de flux qui lui donne naissance). C'est la loi de modération de Lenz.

10.1.2 Loi de Lenz 10'

Les effets de l'induction s'opposent à la cause qui les a produits.

Cette loi qualitative permet de prévoir les effets de l'induction.

Chute d'un aimant dans différents tubes

- tube en plexiglas : c'est un isolant, il n'y a pas d'induction, l'aimant tombe rapidement sous l'effet de la gravité ;
- tube en cuivre : c'est un bon conducteur, le courant créé dans le tube par l'aimant qui tombe génère un champ magnétique qui ralentit l'aimant. C'est une manifestation de la loi de Lenz.

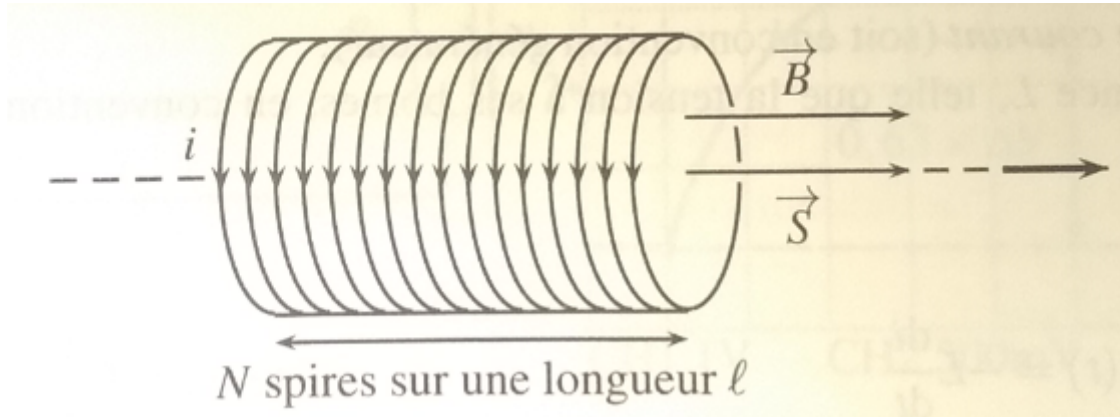
puis cuivre.

Pendant la leçon, penser à traiter qualitativement les cas étudiés avec la loi de Lenz.

Maintenant que l'on a étudié les aspects théoriques de l'induction, on va étudier chacun des deux régimes. Commençons par l'induction de Neumann (champ \vec{B} variable).

10.2 Induction de Neumann (B variable) 12'

10.2.1 Auto-induction



Importance de l'agénérisation : l'orientation du courant définit l'orientation des surfaces. On calcule le flux propre dans le cas où l'on suppose que le champ \vec{B} créé par la bobine est celui d'un solénoïde infini. Le calcul du flux à travers une spire, puis N spires donne

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 N^2 S i}{l} \quad (8)$$

En appliquant la loi de Faraday, on trouve

$$e = -L \frac{di}{dt}, \quad (9)$$

où $L = \mu_0 N^2 S / l$ est l'inductance de la bobine L s'exprime en Henri ($H = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$).

Ici la bobine est traitée en convention générateur car elle est assimilée dans le circuit à un générateur. En convention récepteur, on a l'habitude de travailler avec $U_L = -e$. (Schémas au tableau des deux circuits dans chacune des deux conventions, avec la bobine et une résistance R en série.)

L'énergie stockée dans la bobine est liée à son inductance et se trouve en exprimant la puissance électrique qui parcourt la bobine :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} L i^2 \quad (10)$$

L'énergie stockée dans la bobine se retrouve aussi en calculant l'énergie volumique magnétique $B^2 / 2\mu_0$ et en multipliant par le volume de la bobine.

Vérification de la dépendance en N^2 de l'inductance de plusieurs bobines en mesurant l'inductance d'après la fonction de transfert d'un circuit RL :

- mesure de l'inductance de quatre bobines de même géométrie mais avec des nombres de spires différents (125, 250, 500 et 1000 spires). Une mesure est réalisée devant le jury.
- il est nécessaire de mesurer R à chaque fois car la résistance dépend de la longueur de fil de la bobine. Cette mesure est réalisée précisément à l'aide d'un multimètre Keithley permettant de faire une mesure à quatre points.
- la mesure de L se fait en déterminant la fréquence de coupure du filtre passe bas du premier ordre RL . Pour cela on mesure le rapport entre la tension U_R et la tension du GBF, et on réalise l'acquisition pour différentes fréquences à l'aide du programme python dédié à la mesure de diagramme de Bode.
- en ajustant sur Qtiplot la courbe obtenue par le modèle analytique $\|H(\omega)\| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^2}}$, on en déduit L (connaissant R) car $\omega_c = R/L$.
- les différentes valeurs de L obtenues sont ajustées en fonction du nombre de spire par un modèle $\mu_0 N^\alpha S/L$ et on obtient bien $\alpha \approx 2$.

Comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs déduites de la géométrie des bobines.

Regardons ce qui se passe maintenant dans le cas de l'expérience de Faraday, avec deux bobines.

10.2.2 Inductance mutuelle 25'

Schéma de deux bobines d'inductance L_1 et L_2 , parcourues par des courants i_1 et i_2 . L'inductance mutuelle traduit le couplage entre les deux circuits :

$$e_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \quad (11)$$

- le signe de M dépend de l'orientation des deux circuits ;
- on montre que $M_{12} = M_{21}$: le résultat est presque immédiat en passant par le potentiel vecteur (démonstration dans [37] par exemple).
- l'énergie d'un système de deux inductances couplées par une inductance mutuelle est donnée par

$$E_{\text{tot}} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + M i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 \quad (12)$$

L'inductance mutuelle traduit le fait qu'il est possible de transférer de l'énergie d'un circuit à l'autre.

Traiter le cas du transformateur : faire le calcul de i_1/i_2 avec le théorème d'Ampère et déduire la relation en tension par conservation des puissances. Une application importante de cet effet est le transformateur, nécessaire au transport de l'énergie à haute tension pour diminuer les pertes dues au transfert (les pertes par effets Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité. En travaillant avec des tensions très élevées (~ 400 kV), il est possible de transporter des puissances importantes sans avoir un courant important. On a $P_J = Ri^2 = U^2/R$, mais le U ici correspond à la différence de potentiel entre les deux extrémités du fil électrique, et pas aux 400 kV qui est la différence de potentiel entre le câble et la terre.) Le transformateur est utilisé pour abaisser la tension en vue d'une utilisation par les particuliers.

Après l'induction de Neumann, on va s'intéresser à l'induction de Lorentz, c'est à dire à un circuit mobile.

10.3 Induction de Lorentz (circuit mobile) 28'30

10.3.1 Rail de Laplace

Deux termes :

- force électromotrice : elle traduit le couplage mécanique \rightarrow électrique ;
- force de Laplace, responsable du couplage électrique \rightarrow mécanique.

Schémas du dispositif, mécanique et électrique.

Avant la mise en équation, on peut qualitativement déterminer l'évolution du système lors d'un déplacement de la tige avec la loi de Lenz (...). Mise en équation :

- équation électrique

$$Ri = -v l B \quad (13)$$

- équation mécanique : principe fondamental de la dynamique projeté selon x

$$m\dot{v} = ilB \quad (14)$$

La résolution de ce système donne

$$v = v_0 e^{-t/\tau} \quad (15)$$

où $\tau = \frac{mR}{B^2 l^2}$. La barre est ralenti, ce qui est en accord avec l'analyse qualitative avec la loi de Lenz. Si l'on souhaite arrêter complètement la barre, il faut rajouter un frottement mécanique.

Conversion électromécanique : Schéma des échanges ($P_{laplace}$ et $P_{induction}$) pour faire le lien entre les pertes par effet Joule et la variation d'énergie cinétique. On a $P_{laplace} + P_{induction} = 0$

Freinage par induction utilisé pour les poids lourds ou encore les trains (présente l'avantage de ne pas nécessiter de pièce d'usure). Les courants créés dans la masse métallique sont appelés courants de Foucault. Une autre application de l'induction de Lorentz est la roue de Barlow qui peut être utilisée comme générateur de courant continu (actuellement, cette méthode sert encore pour générer les courants intenses nécessaires aux électrolyses). L'induction est aussi à la base des méthodes de production d'électricité (alternative) actuelles.

Rail de Laplace : le rail a tendance à rester collé sur le support (les faux contacts entre les rails et la tige créent des arcs électriques qui soudent la barre aux rails). On pourrait ici faire une démonstration qualitative de la roue de Barlow.

Conclusion 39'

Au cours de cette leçon, on a vu :

- les lois de l'induction (Lenz et Lorentz) ;
- les inductions de Neumann et Lorentz.

Applications : générateurs, chauffage par induction, micro, chargeur sans fil...

Vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=nIFSZfKTUKA> Railgun de l'espace pour la blague :)

Questions

1. Lors de l'approche historique avec l'expérience de Faraday, vous avez parlé de galvanomètre : qu'est-ce que c'est ? Il s'agit d'un instrument permettant de mesurer de faibles courants électriques. L'aiguille de l'appareil est liée à des spires parcourue par le courant à mesurer, spires placées dans un champ magnétique constant et homogène. Le dipôle magnétique formé par la spire est alors soumis à un couple qui dévie l'aiguille.
2. Lors de l'introduction des lois de l'induction, vous avez introduit trois ingrédients : force de Lorentz, $\vec{E} = -\vec{\text{grad}}V - d\vec{A}/dt$ et $\vec{v} \wedge \vec{B}$: Commenter ces termes. La force de Lorentz permet d'expliquer comment le champ électromagnétique peut mettre en mouvement ou dévier des particules chargées. On repart des équations de Maxwell pour exprimer \vec{E} en fonction des potentiels vecteur et scalaire.
3. Que représentent V et \vec{A} ? voir le cours d'électromag de Jérémie pour des discussions plus poussées. On ne peut pas mesurer directement ni l'un ni l'autre. On a seulement accès à des différences de potentiel ou à la circulation de \vec{A} . Dans le cas d'un solénoïde parfait avec une spire autour, le champ \vec{B} est nul au niveau de la spire pourtant il est possible de créer un fem dans la spire en faisant varier le courant dans le solénoïde (le champ \vec{B} est bien nul mais pas \vec{A} au niveau de la spire). Une autre expérience mettant en évidence le rôle de \vec{A} dans la compréhension d'effets subtils est celle d'Aharonov-Bohm.
4. Comment pourrait-on préciser l'introduction de la force électromotrice e ? Lien entre le travail et la ddp (le travail de la force de Lorentz permet d'introduire la ddp)
5. Dans la force de Lorentz, Que représente \vec{v} ? C'est la vitesse des porteurs de charge.
6. Quel est le référentiel dans lequel est défini \vec{v} ?
7. vitesse du circuit = vitesse des charges ? Ici il faut utiliser la composition des vitesses : $\vec{v} = \vec{v}_{\text{circuit}} + \vec{u}$, où \vec{v}_{circuit} est la vitesse du circuit dans le référentiel du laboratoire et \vec{u} est la vitesse des électrons dans le référentiel lié au circuit. Quand on considère l'effet d'un champ magnétique sur les électrons, on peut alors considérer le cas d'un conducteur filiforme : la vitesse \vec{u} étant alors toujours colinéaire avec le conducteur, seule la vitesse des électrons liée au mouvement du circuit donne lieu à une circulation non nulle ($\vec{u} \wedge \vec{B}$ est toujours orthogonal au conducteur). Dans le cas d'un conducteur ayant une section finie, le déplacement des électrons le long du circuit donne en présence d'un champ magnétique l'effet Hall qui est négligeable dans le conducteur en raison de la densité importante de porteurs de charge.
8. Comment évolue la vitesse de chute de l'aimant en fonction du matériau du tube ? Plus le matériau est conducteur, plus le freinage est efficace, donc la chute longue.
9. Justifier l'approximation du solénoïde infini pour les bobines ? Cette approximation est sans doute discutable car : les bobines utilisées sont de section carrée et la dimension de la section est comparable à la longueur de la bobine. Cependant, même dans le cas d'une simple spire, le champ créé en dehors de l'axe est compliqué à calculer. Les résultats obtenus lors des expériences étant en accord raisonnable avec le modèle simple d'un champ uniforme, on peut ici justifier l'utilisation de cette approximation.
10. Pourquoi sommer les champs \vec{B} ? On peut appliquer le principe de superposition associé à la linéarité des équations de Maxwell.
11. Pourquoi se placer en convention générateur ? Dans le cas de l'induction présenté ici, la bobine est la source de la force électromotrice. Il s'agit d'un générateur qui justifie l'emploi de la convention associée.

12. Puissance stockée dans la bobine. Pourquoi iU_L et pas ei ? Lié à la convention choisie : en convention générateur, on considère l'énergie cédée par la bobine au circuit. En convention récepteur, on s'intéresse à l'énergie reçue par la bobine.
13. Manip : Quelle est la valeur de la résistance de la bobine et justifier le choix de la résistance? (dépend du nombre de spires de la bobine) Il faut que la résistance de la bobine reste faible devant la résistance placée en série avec la bobine. De plus, on fait en sorte que la fréquence de coupure du passe base soit de l'ordre de 10 kHz
14. D'où viennent les incertitudes sur la mesure? Comment sont calculées les erreurs? Lors de la mesure de la fréquence de coupure, l'incertitude vient de l'ajustement des données expérimentales par le modèle analytique. La déduction de L dépend aussi de la valeur de la résistance $R+r$ qui est mesurée précisément avec l'ohmmètre numérique et une mesure à quatre points. Cette incertitude est donnée par la notice de l'appareil.
15. Est-il possible de rajouter des erreurs sur les points acquis à l'oscilloscope à la main? Oui en se référant à la notice de l'instrument mais elles sont petites venant de l'oscilloscope.
16. Pourquoi avoir choisi de mesurer L d'après le diagramme de Bode? Essentiellement car il faut une mesure quantitative dans la leçon docteur. Autres méthodes : $u_{\max}/2$, temps de montée, etc. Justifiée par une approche pédagogique.
17. Valeur d'inductance comparée à quoi? A celle mesurée au RLC-mètre, à la valeur annoncée par le constructeur, à la valeur attendue compte tenu du modèle.
18. D'où vient l'incertitude sur l'inductance théorique? Principalement de l'inhomogénéité du champ \vec{B} dans toutes les spires et sur toute la surface d'une même spire.
19. Inductance mutuelle? pourquoi mettre des dérivée ronde? (erreur)
20. Une seule équation : couplage de 1 vers 2. Qu'est ce qui se passe dans l'autre sens? Le problème est symétrique.
21. L'inductance mutuelle est elle la même de 12 ou 21? Oui.
22. Équivalence des puissances de Laplace et induit? Oui car sinon fuck la physique.
23. Roue de Barlow pour générer du courant? Oui pour les forts courants de certaines électrolyses, non pour la production électrique actuelle (alternateurs).

Commentaires

Point noir de la leçon : comment amener les lois de l'induction? On peut écrire que la vitesse des électrons est la composition des électrons dans le circuit + la vitesse du circuit. Une autre possibilité serait de faire l'approche historique entière et introduire le $d\phi$ directement. Bq d'applications : bien A n'est pas mesurable car il y a une jauge près mais ddp mesurable et la circulation de A aussi.

11 LP11 Rétroaction et oscillations

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

11.1 Template

11.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

12 LP12 Traitement d'un signal, étude spectrale

Niveau :

CPGE (MP, PSI)

Prérequis :

- Electrocinétique, fonction de transfert
- Filtre RC

Objectif de la leçon : Mettre en évidence l'importance du traitement de signal dans les protocoles de communication actuels. Discuter des avantages et inconvénients des traitements numériques et analogiques. Se familiariser avec l'étude spectrale.

Bibliographie

- [2]
- [11]
- [40]
- [34]

Cette leçon se prête particulièrement bien à des expériences qualitatives rapides sur l'oscilloscope, aussi bien dans le filtrage avec l'étude de l'action du RC sur un créneau par exemple que pour montrer le traitement numérique. Il faut bien reprendre en main l'oscilloscope, notamment sur la FFT pour montrer rapidement les effets mentionnés dans la leçon.

Introduction

Dans le cadre des télécommunications, on s'intéresse à la transmission d'un signal complexe qui doit être traité afin d'être transporté sur de longues distances. On distingue les méthodes analogiques qui conservent la nature continue du signal des méthodes numériques qui nécessitent sa discrétisation. Ces deux méthodes présentent chacune des avantages et inconvénients que l'on discutera au cours de cette leçon. L'étude spectrale permet de s'affranchir de la redondance temporelle de la plupart des signaux et constitue donc un outil puissant pour leur étude.

12.1 Spectre d'un signal et filtrage

L'objectif de cette partie est de justifier le passage à l'étude de spectre et de comprendre comment agit un système simple (filtre linéaire) sur le signal. Par la suite il est possible d'étudier directement les spectres.

Le signal est une grandeur physique dont les variations temporelles encodent une information.

12.1.1 Signal périodique

Suivre [40]. Tout signal périodique $s(t)$ de fréquence f_s s'exprime comme la superposition de fonctions sinusoïdales de fréquence multiple de f_s :

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi n f_s t + \varphi_n). \quad (16)$$

Toutes les informations sur $s(t)$ sont contenues dans les A_n et φ_n : on peut les représenter en fonction de la fréquence sous forme de spectres en amplitude et en phase. Faire les schémas $s(t)$, $A_n(f)$ et $\varphi_n(f)$.

Spectre d'un signal en créneau.

FFT d'un signal en créneau sur l'oscilloscope.

Donner les interprétations physiques de A_0 , A_1 et A_n : les premières harmoniques décrivent la forme générale du signal mais les détails sont donnés par les hautes fréquences, c'est-à-dire par les harmoniques de rang élevé.

Spectre du signal sonore émis par un verre. Parler de la transformée de Fourier pour les signaux non périodiques.

Cette description permet de s'affranchir de la redondance d'un signal périodique et est particulièrement utile pour décrire la réponse des filtres linéaires.

12.1.2 Filtrage linéaire

Attention à la cohérence dans cette partie avec les pré-requis : si les filtres électroniques ont déjà été vus, il n'est pas utile d'introduire les notions de diagramme de Bode etc. Il faut plutôt je pense rattacher la description générale au cas particulier des filtres électroniques.

Faire un schéma d'un filtre avec e et s . Définition d'un filtre : système pour lequel il existe une relation à coefficients constants entre les dérivées temporelles de l'entrée et celles de la sortie :

$$b_0 s(t) + b_1 \frac{ds}{dt} + \dots + b_m \frac{d^m s}{dt^m} = a_0 e(t) + a_1 \frac{de}{dt} + \dots \quad (17)$$

m est appelé l'ordre du filtre. Ce type de système est linéaire ce qui permet d'utiliser le principe de superposition. Il permet d'agir sur le spectre d'un signal sans modifier le contenu fréquentiel (ne fait pas apparaître de nouvelles fréquences, ce qui traduirait une non-linéarité).

On suppose un signal d'entrée de la forme :

$$e(t) = E \cos(\omega t + \varphi_e) \quad (18)$$

et on utilise la notation complexe :

$$\underline{e}(t) = E e^{j(\omega t + \varphi_e)}. \quad (19)$$

En faisant de même pour la sortie, on définit la fonction de transfert d'un filtre linéaire comme le rapport :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{s}}{\underline{e}}. \quad (20)$$

Calculs du filtre RC en utilisant les impédances complexes. On obtiendrait le même résultat en établissant l'équation temporelle du circuit.

Filtre passe-bas.

Diagramme de Bode d'un circuit RC. Montrer l'effet du filtre sur un signal sinusoïdal en modifiant la fréquence pour mettre en évidence le caractère passe bas. Faire les calculs puis acquérir et ajuster le diagramme de Bode obtenu par le modèle.

Prendre le temps de discuter l'altération du spectre en fonction de la différence de fréquence entre le signal et le filtre dans le cas simple du passe-bas.

Mettre en évidence le comportement intégrateur du passe-bas par le calcul dans le cas $\omega \gg \omega_c$ et par l'expérience.

De manière générale les filtres permettent d'isoler une partie du spectre d'un signal pour en extraire l'information essentielle dont la nature varie avec l'application : musique, télécommunications, mesures de précisions... Il existe de nombreux types de filtres linéaires : passe-bas, passe-haut, passe-bande, etc. et pas seulement d'ordre 1. Ils peuvent agir dans des domaines différents (mécanique, électronique, etc.).

Ces systèmes linéaires sont nécessaires pour le traitement du signal dans les télécommunications mais pas suffisants.

12.2 Transmission analogique : la radio AM

12.2.1 Modulation

On s'intéresse à la transmission d'une musique pour expliquer le fonctionnement de la radio par exemple. Il est exclu de les transmettre via des ondes mécaniques pour des raisons évidentes : on préfère utiliser des ondes électromagnétiques. Il faut donc premièrement transformer le signal sonore en signal électrique grâce à un microphone par exemple. La fréquence du signal à transmettre est de l'ordre du kHz, ce qui correspond à une longueur d'onde de 300 km. Comme les antennes sont du même ordre de grandeur que le signal à détecter il faudrait des antennes gigantesques ! Pour éviter cela on va utiliser une porteuse de haute fréquence pour transporter l'information base fréquence, ce qui nécessite une modulation.

Cette opération nécessite un composant non linéaire : le multiplieur. Faire un schéma

$$s_{AM}(t) = (1 + \alpha s(t))s_p(t) \quad (21)$$

Faire le calcul pour montrer que

$$s_{AM}(t) = A_p \left[\cos(\omega_p t) + \frac{m}{2} \cos(\omega_p - \omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_p + \omega)t \right] \quad (22)$$

On voit immédiatement que le signal modulé contient trois fréquences.

Spectre du signal modulé en amplitude.

Parler du problème de la porteuse qui nécessite beaucoup d'énergie.

On obtient donc un signal qui peut être transporté mais qui n'est pas utilisable en tant que tel. Il est nécessaire de le démoduler.

12.2.2 Démodulation synchrone

Parler rapidement de la détection d'enveloppe.

Faire le calcul de la démodulation synchrone et insister sur l'importance du filtrage.

Spectre du signal démodulé en amplitude.

Si les télécommunication analogiques sont encore utilisées actuellement, le numérique devient de plus en plus présent. Inconvénients de la transmissions analogique : sujet au bruit, difficile à stocker.

12.3 Traitement numérique

12.3.1 Numérisation

Avantages du numériques [11] p136. Définition de l'échantillonnage [11] p127.

Numérisation d'un signal.

Il y a une perte d'information mais facilement mémorisable.

Critère de Shanon.

Parler des DFT, FFT. Tracer le spectre d'un signal échantillonné et faire apparaître la création de nouvelle fréquence en raisonnant par analogie avec la modulation vue avant. Repliement de spectre. Amener la nécessité de filtrer avant l'acquisition pour éviter le repliement de spectre.

Template

12.3.2 Filtrage

Présenter la méthode de discrétisation en prenant l'exemple du passe bas.

Filtrage numérique.

Le traitement du signal peut être fait a posteriori mais aussi en temps réel : parler des micro-contrôleurs qui permettent de réaliser des filtres complexes sans modifier le hardware. Il y a donc plus de flexibilité !

Conclusion

Traitement du signal pour la détection des ondes gravitationnelles. Il faut garder du temps pour traiter convenablement cette partie : elle permet de récapituler le contenu de la leçon :

- étude d'un spectre ;
- filtrage analogique : expliquer les systèmes de suspension des miroirs filtrage passe-bande pour éliminer hautes et basses fréquence du signal à la sortie de l'interféromètre ;
- filtrage numérique : traitement du signal pour éliminer les harmoniques, analyse des données (massives) et automatique.

On peut aussi parler des asservissements.

13 LP13 Ondes progressives, ondes stationnaires

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

13.1 Template

13.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

14 LP14 Ondes acoustiques

Niveau :

CPGE

Prérequis :

- Mécanique des fluides
- Thermodynamique
- Ondes électromagnétiques

Objectif de la leçon : Décrire les ondes acoustiques dans différents milieux, leur propagation et ainsi expliquer le principe de fonctionnement de plusieurs instruments de musique.

Bibliographie

- [12]
- [8]
- [31]
- [41]
- [24]
- [28]
- [42]

Introduction

Montrer l'extrait de la vidéo [42]. Dans cette vidéo, on a vu de nombreux exemples qui montrent le caractère vibratoire des ondes acoustiques et leur lien avec le son, la musique. L'objectif de cette leçon va être de décrire les ondes acoustiques, principalement dans les fluides et de voir comment leur manipulation peut conduire à la fabrication d'instruments, mais aussi à la compréhension du comportement de nombreux objets.

14.1 Description d'une onde acoustique

Les ondes acoustiques sont des ondes mécaniques. Elles correspondent à la propagation d'une déformation dans un milieu matériel. Insister sur la nécessité d'un milieu matériel, qui peut être fluide ou solide. Ici on va principalement s'intéresser aux ondes acoustiques dans l'air.

14.1.1 Approximation acoustique

Les ondes acoustiques résultent d'un couplage entre des variations de pression et le déplacement des particules de fluide. On va donc s'intéresser à ces deux grandeurs principalement. Cependant, le fluide est compressible et il va aussi y avoir des variations de volume donc de masse volumique. D'autres grandeurs (température, etc.) sont également amenées à varier ce qui va conduire à effectuer certaine hypothèse, que l'on pourra vérifier ensuite.

Dans un premier temps, on s'intéresse à un fluide au repos :

- de vitesse moyenne nulle ;
- de pression moyenne P_0 ;
- de masse volumique moyenne μ_0 .

L'onde sonore correspond à une faible perturbation du fluide par rapport à cet état de repos :

- $\vec{v}(M, t) = \vec{v}_1(M, t)$, petite devant la vitesse du son $c = \lambda\nu$;
- $P(M, t) = P_0 + p_1(M, t)$, où $p_1(M, t) \ll P_0$;

— $\mu(M, t) = \mu_0 + \mu_1(M, t)$ où $\mu_1(M, t) \ll \mu_0$;

et sera traité comme tel. On négligera ainsi tous les termes d'ordre deux dans les équations. C'est l'approximation acoustique.

Dans le cadre de cette leçon, on considère l'écoulement comme parfait en négligeant la viscosité du fluide. Ceci conduit à une déformation élastique rapide du fluide, c'est à dire réversible, ce qui nous permettra de formuler une hypothèse thermodynamique.

On vient de définir le cadre de l'étude des ondes acoustiques dans un fluide. On peut maintenant déterminer l'équation qui régit l'évolution de ces ondes en exploitant les outils de la mécanique des fluides et de la thermodynamique.

14.1.2 Équation de propagation

On peut tout d'abord utiliser l'équation de la conservation locale de la masse :

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \text{div}(\mu \vec{v}) = 0,$$

qui conduit après linéarisation à

$$\frac{\partial \mu_1}{\partial t} + \mu_0 \text{div} \vec{v}_1 = 0.$$

Cette équation fait apparaître un premier lien entre μ_1 et \vec{v}_1 alors qu'on préférerai un lien entre p_1 et \vec{v}_1 .

On peut faire ce lien à travers un coefficient thermodynamique. La transformation associée au passage de l'onde est rapide donc on la supposera adiabatique et réversible, c'est à dire isentropique. Dans ce cas on utilise le coefficient de compressibilité isentropique χ_S

$$\chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \right)_S.$$

Un développement de Taylor donne ainsi la relation $\mu_1 = \chi_S \mu_0 p_1$. En l'injectant dans l'équation de conservation de la masse, on obtient après linéarisation

$$\chi_S \frac{\partial p_1}{\partial t} + \text{div} \vec{v}_1 = 0. \quad (23)$$

L'écoulement étant parfait, on utilise l'équation d'Euler en négligeant la gravité :

$$\mu \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v} \text{grad} \right) \vec{v} \right) = -\text{grad} P.$$

L'hypothèse v_1 petite conduit à négliger le terme non linéaire de l'équation d'Euler

$$\left\| \left(\vec{v} \text{grad} \right) \vec{v} \right\| \ll \left\| \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right\|$$

ce qui est vrai si $\|v_1\| \ll c$, où $c = \lambda \nu$ est la vitesse de l'onde acoustique. Cette condition peut être vérifiée a posteriori. Avec ces hypothèses, on aboutit à l'équation linéarisée

$$\mu_0 \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} = -\text{grad} p_1. \quad (24)$$

En dérivant l'équation de conservation de la masse 23 par rapport au temps et en prenant la divergence de l'équation d'Euler 24, on obtient l'équation de d'Alembert pour la surpression p_1

$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \Delta p_1 = 0, \quad (25)$$

où $c = 1/\sqrt{\chi_S \mu_0}$ est la vitesse de l'onde acoustique. De même, en dérivant Euler par rapport au temps et en prenant le gradient de la conservation de la masse, on obtient l'équation de d'Alembert pour la vitesse \vec{v}_1

$$\frac{\partial^2 \vec{v}_1}{\partial t^2} - \frac{1}{c^2} \Delta \vec{v}_1 = 0. \quad (26)$$

Pour l'équation de d'Alembert sur la vitesse, il faut de plus supposer l'écoulement irrotationnel, ce qui est raisonnable dans l'hypothèse d'un écoulement parfait et en appliquant le théorème de Kelvin.

Pour établir ces équations de propagation, on a fait plusieurs hypothèses qu'il faut vérifier.

14.1.3 Retour sur les hypothèses

Quelques ordres de grandeur. L'intensité sera définie proprement ensuite. Même pour des sons très intenses, les hypothèses de perturbations faibles sont vérifiées, donc l'approximation acoustique est valide.

La deuxième hypothèse réalisée est celle d'une transformation adiabatique réversible. Pour une évolution isentropique du fluide, on utilise la loi de Laplace $PV^\gamma = \text{cte}$, où $\gamma = c_p/c_v$ est le rapport des capacités calorifiques à pression et volume constant. On trouve ainsi $\chi_S = 1/\gamma P_0$ et donc

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\mu_0}}.$$

Si le fluide peut-être considéré comme un gaz parfait, on obtient finalement en utilisant l'équation d'état des gaz parfaits

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T_0}{M}}. \quad (27)$$

Le plus simple pour redémontrer cette relation est de différencier $\ln(PV^\gamma)$ pour exprimer la compressibilité isentropique.

On peut vérifier expérimentalement cette relation en mesurant la vitesse du son dans l'air.

Mesure de la vitesse du son dans l'air avec une onde ultra-sonore. On pourrait remonter à cette vitesse en mesurant le temps de vol d'une impulsion brève entre un émetteur et un récepteur ultra-sonore mais cette mesure est sujette à une incertitude importante car on ne connaît pas exactement leur géométrie. Je préfère ici mesurer la longueur d'onde en déplaçant de plusieurs longueurs d'onde le récepteur devant l'émetteur sur un banc optique.

L'air n'est pas un milieu dispersif pour les ondes acoustiques.

Pour une transformation isotherme, on utilise le coefficient de compressibilité isotherme χ_T et on trouve

$$c = \sqrt{\frac{RT_0}{M}},$$

ce qui n'est pas en accord avec les observations expérimentales.

Les résultats que l'on a obtenu jusqu'à maintenant semblent expliquer convenablement les observations expérimentales. Montrer la vidéo [28]. Cette vidéo met en évidence que les ondes sonores transportent de l'énergie.

14.2 Aspects énergétiques

Dans cette partie, on fait directement le parallèle avec les résultats obtenus pour les ondes électromagnétiques.

14.2.1 Conservation de l'énergie

La puissance $d\mathcal{P}$ transférée par l'onde acoustique à travers une surface orientée $d\vec{S}$ correspond à la puissance des forces de pression soit

$$d\mathcal{P} = (P_0 + p_1)d\vec{S} \cdot \vec{v}_1.$$

Comme P_0 est constante, elle donnera avec \vec{v}_1 un terme de moyenne temporelle nulle qu'il n'est pas nécessaire de considérer. On peut ainsi définir le vecteur de Poynting sonore $\vec{\Pi}$

$$\vec{\Pi} = p_1 \vec{v}_1, \quad (28)$$

qui correspond aux transferts d'énergie dû à la surpression donc aux ondes acoustiques.

Par ailleurs on souhaite exprimer la densité d'énergie du milieu liée au passage de l'onde acoustique. Comme il s'agit d'une onde de vitesse et de pression, on retrouve deux contributions :

— cinétique e_c liée à la vitesse \vec{v}_1

$$e_c = \frac{1}{2}\mu_0 v_1^2;$$

— potentielle e_p lié à la compression du fluide et analogue à l'énergie potentielle d'un ressort comprimé

$$e_p = \frac{1}{2}\chi_s p_1^2.$$

La densité volumique d'énergie associée à l'onde acoustique e est donc

$$e = \frac{1}{2}\mu_0 v_1^2 + \frac{1}{2}\chi_s p_1^2. \quad (29)$$

Le cadre de la description des ondes acoustiques nous a conduit à négliger les phénomènes dissipatifs. Au niveau local, une variation d'énergie ne peut être due qu'à son transport par l'intermédiaire des forces de pression, si bien qu'on peut retrouver l'équation locale de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \text{div} \vec{\Pi} = 0. \quad (30)$$

Dans ce modèle, une onde plane n'est pas atténuée et l'atténuation d'une onde sphérique n'est due qu'à un facteur géométrique de dilution dans l'espace.

Pour une onde plane progressive harmonique, $e_c = e_p$.

Les flux de puissance dus aux ondes acoustiques sont généralement très faibles, si bien qu'il est souvent utile d'utiliser l'intensité acoustique.

14.2.2 Intensité d'une onde acoustique

L'intensité sonore I est définie comme la moyenne temporelle de la puissance reçue par unité de surface, soit en utilisant le vecteur de Poynting

$$I = \left\langle \vec{\Pi} \cdot \vec{n} \right\rangle.$$

Pour plus de commodité, il est d'usage de l'exprimer en décibel (dB)

$$I_{\text{dB}} = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (31)$$

avec $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ qui correspond au seuil d'audibilité.

Audition humaine. On entend bien les sons entre 20 Hz et 20 kHz. L'oreille est très sensible à une grande diversité d'intensité sonores ce qui justifie l'utilisation d'une échelle logarithmique.

Ici c'est propre à l'Homme mais certains animaux sont capables de produire et percevoir des infra-sons (éléphant, girafe) et ultra-sons (cétacés).

Terminons le parallèle avec l'électromagnétisme en s'intéressant à la notion d'impédance acoustique, qui exprime un lien simple entre la vitesse du fluide et la surpression.

14.2.3 Impédance acoustique

Ici on s'intéresse à un type de solutions particulières de l'équation de d'Alembert : les ondes planes progressives harmoniques de la forme

$$p_1 = P_0 \cos \left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi \right),$$

analogues aux OPPH électromagnétiques, où $\vec{k} = 2\pi/\lambda$ est dans la direction de propagation de l'onde. Comme les équations qui décrivent le phénomène sont linéaires, on peut utiliser la notation complexe

$$\underline{p_1} = \underline{P_0} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}. \quad (32)$$

En utilisant l'équation d'Euler 24, on trouve

$$\mu_0 i \omega \underline{\vec{v}_1} = i \vec{k} \underline{p_1},$$

d'où

$$\underline{\vec{v}_1} = \frac{1}{\mu_0 c} \underline{p_1} \vec{n}. \quad (33)$$

Ce lien entre la vitesse et la surpression peut être exprimé comme en électromagnétisme à l'aide de l'impédance acoustique du milieu Z définie comme

$$Z = \frac{p_1}{v_1}, \quad (34)$$

exprimé en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$. Dans le cas d'une onde plane progressive harmonique, ce rapport vaut

$$Z = \mu_0 c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\chi_s}}. \quad (35)$$

Plus la masse volumique du fluide est grande et plus la compressibilité du fluide est faible, plus l'impédance est grande, d'où

$$Z_{\text{solide}} > Z_{\text{liquide}} \gg Z_{\text{gaz}}.$$

L'impédance électromagnétique est définie comme

$$Z = \frac{E}{H} = \frac{\mu}{\epsilon}.$$

De la même façon qu'en électromagnétisme, la propagation d'une onde acoustique à travers un dioptré donne naissance à une onde réfléchie et une onde transmise.

Réflexion et transmission sur un dioptré. On voit qu'un changement brutal et important d'impédance ($Z \rightarrow 0$ ou $Z \rightarrow \infty$) conduit à une réflexion totale de l'onde acoustique incidente. On peut parler du gel pour l'échographie, de l'écho contre un mur, etc.

Des réflexions multiples peuvent conduire à l'établissement d'ondes stationnaires. Leur maîtrise permet de fabriquer des cavités résonantes en vue de réaliser des instruments de musique par exemple.

14.3 Quelques exemples

14.3.1 Tuyau sonore

Schéma du tuyau. On s'intéresse à une onde acoustique se propageant dans le tuyau. Les extrémités du tuyau imposent des conditions aux limites :

- une extrémité ouverte impose que la pression doit être P_0 , mais ne donne pas de restriction sur la vitesse ;
- à l'inverse, une extrémité fermée impose une vitesse nulle (impénétrabilité) mais rien sur la pression.

Les extrémités du tuyau correspondent donc à des sauts d'impédance

$$Z_{\text{ferm}} = \infty, \quad Z_{\text{ouvert}} = 0, \quad (36)$$

qui vont donner lieu à des réflexions totales. Dans le tuyaux, on a donc une superposition d'ondes contra-propageantes qui donne naissance à une onde stationnaire de la forme

$$p_1 = P_0 \cos(\omega t) [A \cos(kx) + B \sin(kx)]. \quad (37)$$

Pour un tuyau ouvert aux deux extrémités, on trouve par exemple $A = 0$ et

$$k_n = n \frac{\pi}{L}. \quad (38)$$

Mode d'un tuyau sonore. Comparaison avec un tuyau fermé à une extrémité

Orgue de la cathédrale Saint Étienne.

Micro-pilier. Le micro-pilier est un analogue solide du tuyau sonore. On retrouve les mêmes conditions aux limites, mais il faut utiliser le module d'Young. Bien détailler ce qu'on voit à l'écran : la membrane permet de tenir le pilier etc.

14.3.2 Plaque vibrante

Plaque de Chladni. Présentation rapide du système, mêmes équations qui interviennent, modes obtenus en tenant compte des conditions aux limites, etc. Cette fois-ci il s'agit d'ondes transverses et pas longitudinales.

Conclusion

Récapitulatif et ouverture avec l'exemple du train :

- onde dans la caténaire (il a fallu retendre les caténaire lors des records de vitesse du TGV) ;
- ambiance sonore dans les cabines ;
- propagation des vibrations dans les structures.

15 LP15 Propagation guidée des ondes

Niveau :

CPGE

Prérequis :

- Ondes électromagnétiques dans le vide
- Ondes acoustiques
- Interférences lumineuses

Objectif de la leçon : Faire apparaître la dispersion introduite par les conditions aux limites et la discrétisation des modes propagateurs.

Bibliographie

- [43]
- [35], p771.
- [37]
- [11]
- [30]

Introduction

Dans le cas d'une onde sphérique valable aussi pour une antenne, l'amplitude décroît en $1/r$ et l'énergie en $1/r^2$. Le guidage permet d'éviter cette dilution de l'onde dans le milieu et de transporter de l'information sur de plus grandes distances. Le guidage peut intervenir dans plusieurs types d'ondes et de fréquences. Le guidage introduit cependant de la dispersion qu'il faudra prendre en compte dans les applications.

15.1 Modèle du guide électromagnétique

15.1.1 Position du problème

Globalement, on suivra [43] à partir de la p51.

Faire un schéma et donner les hypothèses. Établir l'équation de d'Alembert. Poser les conditions aux limites. Mettre en évidence l'existence de deux groupes de solutions TE et TM formant une base des solutions, notion de mode hybride.

On va s'intéresser aux solutions TE.

15.1.2 Solutions TE

Justifier la forme des solutions cherchées par l'idée d'une solution propagative qui satisfasse l'équation de d'Alembert et les conditions aux limites. Commenter sur la solution : stationnaire dans une direction et propagative dans l'autre. Introduire la constante de propagation, faire le lien avec k en marquant bien qu'il n'ont pas la même signification.

Aboutir sur la forme du champ E en mentionnant que tout le reste s'exprime en fonction de lui. Quantification des modes, caractérisé par un entier donné.

Allure des solutions TE.

On peut mentionner la décomposition en OPPH pour l'analyse géométrique du problème.

Si les conditions aux limites ne modifient pas l'équation de propagation, elles imposent des conditions fortes sur les modes pouvant se propager dans le guide.

15.1.3 Relation de dispersion

Établir la relation de dispersion.

Relation de dispersion pour le guide plan-plan.

Mettre en évidence les notions de fréquence de coupure (le guide est un passe haut), avec l'interprétation si l'on envoie une OPPH sur le guide ([43], p56), de guidage monomode ou non.

Faire apparaître la vitesse de phase et la vitesse de groupe et discuter de leur signification.

Ce modèle du guide a permis de mettre en évidence les particularités liées à la propagation guidée d'une onde (dispersion, mode et fréquence de coupure) mais il ne représente pas un outils pratique de la vie courante.

15.2 Guide d'onde réels

15.2.1 Guide microonde

[35] p771. [43] p57.

Il s'agit d'un guide rectangulaire. Les conditions aux limites sont similaires aux précédentes mais présentes dans deux directions. Donner la relation de dispersion et reparler de la condition monomode, et de comment rendre un guide monomode à une fréquence fixée : en réduisant sa dimension transverse. Faire l'AN pour les microonde d'un four. Justifier qu'un guide "plat" fonctionne.

Le guidage ne s'applique pas seulement au domaine des ondes électromagnétiques. Voyons un exemple avec les ondes acoustiques.

15.2.2 Tuyau sonore

Présenter les conditions aux limites dans le cadre de l'écoulement parfait : vitesse tangentielle sur les parois. Insister sur la particularité des ondes longitudinales : le mode fondamental n'est pas affecté, les autres modes ont une vitesse plus faible que dans l'air. Donner la relation de dispersion. La symétrie cylindrique complique la résolution analytique et fait intervenir les fonctions de Bessel dans les bases de solution.

Mesure des vitesses de groupe des ondes acoustiques dans un tuyau sonore.
Montrer le fondamental en déplaçant latéralement l'émetteur. Incliner l'émetteur. Faire avec plusieurs tuyaux.

Cette expérience est assez abstraite mais on utilisait avant des cornets acoustiques comme amplificateurs.

On voit qu'envoyant un pulse dans un milieu dispersif, on limite le débit... ce qui est un problème dans les télécommunications actuelles qui se font par fibre optiques.

15.2.3 Fibre optique

Faire le raisonnement géométrique à partir de considérations d'interférences constructives. qui impose la quantification des modes. Approche très simpliste mais met en évidence la dispersion : une impulsion est élargie. On utilise des fibres à gradient d'indice pour limiter la dispersion.

Fibre optique.

On pourrait utiliser des fibres monomode. Les différents modes permettent de faire voyager plus d'information

Conclusion

Modes, dispersion, télécommunications.

16 LP16 Microscopies optiques

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

16.1 Template

16.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

17 LP17 Interférences à deux ondes en optique

Niveau :

CPGE

Prérequis :

- Ondes électromagnétiques dans le vide

Objectif de la leçon : Comprendre pourquoi il est difficile d'observer des interférences en optique et en voir quelques applications.

Bibliographie

- [18]
- [36]
- [6]

Introduction

Le phénomène d'interférence est fondamentalement associé aux ondes. Elles sont facilement observées dans d'autres domaines de la physique (ex : acoustique pour différencier deux notes proches, accordage d'une guitare).

Battement entre deux diapasons légèrement désaccordés.

Pourtant, on observe rarement des interférences en optique. Il suffit de regarder la façon dont éclairée la salle pour s'en convaincre (plusieurs panneaux lumineux sans battement).

On veut comprendre pourquoi il est difficile d'observer des interférences en optique et pourquoi il en existe de nombreuses applications ?

17.1 Superposition de deux ondes

17.1.1 Éclairement

Depuis Maxwell et les expériences de Wiener, on sait que la vibration lumineuse est associée à la composante \vec{E} du champ électromagnétique :

$$\vec{E}(M, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t + \varphi(M, t))} \quad (39)$$

On s'intéresse à l'éclairement $I(M, t)$ défini par

$$I(M, t) = \left\langle \vec{\Pi}(M, t) \right\rangle_t = \frac{\epsilon_0 c}{2} E_0^2. \quad (40)$$

Pour la suite on oublie le terme $\epsilon_0 c$ et on définit l'éclairement

$$I(M, t) = \left\langle \vec{E}(M, t) \cdot \vec{E}^*(M, t) \right\rangle_t \quad (41)$$

Les équations de Maxwell sont linéaires, on peut sommer les champs $\vec{E}_1(M, t)$ et $\vec{E}_2(M, t)$ et calculer l'éclairement total

$$I(M, t) = \left\langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)(\vec{E}_1^* + \vec{E}_2^*) \right\rangle_t = I_1 + I_2 + 2\Re \left\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* \right\rangle_t \quad (42)$$

L'éclairement total peut être différent de la simple somme des éclairements dus à chacune des sources.

17.1.2 Conditions d'interférence

On développe le terme d'interférence :

$$2\Re \left\langle \vec{E}_1 \vec{E}_2^* \right\rangle_t = \left\langle \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos [\Delta\omega t + \Delta\varphi_0(t) + \Delta\varphi_k(M)] \right\rangle_t. \quad (43)$$

Ce terme est non nul si :

- les polarisations des deux ondes ne sont pas orthogonales. Pour la suite, on suppose que les deux ondes ont la même polarisation.
- $\Delta\omega = 0$. Si $\Delta\omega \neq 0$, on s'attend à observer un battement temporel : à comparer aux détecteurs usuels ($\omega_{\text{oeil}} < 2\pi \times 50 \text{ Hz}$, $\omega_{\text{phd}} < 2\pi \times 10 \text{ GHz}$). Le doublet jaune du sodium donne $\Delta\omega_{\text{Na}} < 2\pi \times 2 \text{ THz}$. On observe pas d'interférences sauf dans des cas très particuliers (ex : battement entre deux lasers pour les asservir, détection hétérodyne, spectroscopie).
- $\Delta\varphi_0(t)$ stationnaire (indépendant du temps. Le déphasage ne doit dépendre que du chemin parcouru par chacune des deux ondes. Ceci impose une cohérence entre les deux ondes, notion sur laquelle on reviendra.

Une solution simple pour obtenir deux sources cohérentes est de créer des sources secondaires à partir d'une même source ponctuelle pour les faire interférer. Il existe des dispositifs à division du front d'onde (trous d'Young, bimiroir de Fresnel) et dispositifs à division d'amplitude (Michelson, Mach-Zender).

17.2 Une dispositif à division du front d'onde : les fentes d'Young

17.2.1 Dispositif expérimental

Schéma des fentes d'Young

Fentes d'Young éclairées par un laser He-Ne vert (fente simple pour la diffraction puis fente double pour les interférences).

L'observation de cette figure d'interférence (1801) a permis de confirmer le caractère ondulatoire de la lumière.

Interférences constructives et destructives.

17.2.2 Calcul de la différence de marche

La différence de phase à l'origine est nulle car les ondes sont issues de la même source. Le calcul du déphasage se ramène à un calcul de différence de marche

$$\delta = (SS_2M) - (SS_1M). \quad (44)$$

La source est sur l'axe optique, on a donc $(SS_1) = (SS_2)$. Après les fentes on a

$$(S_1M) = \sqrt{D^2 + \left(\frac{a}{2} - x\right)^2}. \quad (45)$$

Comme $D \gg x, a$, on obtient

$$(S_1M) \approx \frac{D}{2} \left[1 + \left(\frac{a - 2x}{2D} \right)^2 \right] \quad (46)$$

et de la même façon

$$(S_2M) \approx \frac{D}{2} \left[1 + \left(\frac{a+2x}{2D} \right)^2 \right]. \quad (47)$$

Ainsi,

$$\delta = (S_2M) - (S_1M) \approx \frac{ax}{D}. \quad (48)$$

17.2.3 Figure d'interférence

On obtient donc sur l'écran un éclairement modulé spatialement de la forme

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{ax}{\lambda D} \right) \right]. \quad (49)$$

L'éclairement varie rapidement avec la différence de marche, ce qui permet d'utiliser des dispositifs interférentiels pour des mesures très précises de petits déplacements (mesures de forces faibles par déviations de nano-miroirs, optomécanique, interférométrie gravitationnelle) ou encore de variation d'indices optiques (mesure de l'indice de l'air).

On appelle interfrange i la période spatiale de la figure :

$$i = \frac{\lambda D}{a}. \quad (50)$$

Mesure de l'interfrange pour remonter à l'écartement entre les fentes. À comparer à la valeur du fabricant.

Autres mesures réalisées en préparation pour différents écartements des fentes.

Le contraste \mathcal{C} est défini tel que

$$\mathcal{C} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (51)$$

Ici le contraste vaut 1.

On a étudié le cas d'une source ponctuelle monochromatique, qu'il est plutôt rare de rencontrer. Que se passe-t-il pour une source réelle ?

17.3 Cohérence de la source

17.3.1 Évolution du contraste

Modification du schéma précédent avec une deuxième source de largeur.

Les sources sont incohérentes, on somme les éclairements. On observe un brouillage si les figures sont décalées d'un demi interfrange.

Évolution du contraste dans le cas de deux sources ponctuelles.

Applications : mesure de l'écart angulaire entre deux étoiles lointaines.

Passage en source étendue avec une lampe Quartz-Iode et une fente réglable. On observe une variation du contraste suivant la largeur de la fente source.

17.3.2 Source étendue

On suppose que chaque point de la fente source émet la même intensité lumineuse I_l avec

$$I_0 = \int_{-b/2}^{b/2} I_l dX. \quad (52)$$

Schéma. L'éclairement dû à un élément de longueur dX de la source est donné par

$$dI = 2I_l \left[1 + \cos \left(k \frac{ax}{D} + k \frac{aX}{d} \right) \right] dX. \quad (53)$$

Les sources étant incohérentes, on peut sommer les éclairements et on obtient après calcul en utilisant la relation $\sin p - \sin q = 2 \cos \frac{p+q}{2} \sin \frac{p-q}{2}$

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(k \frac{ax}{D} \right) \sin \left(k \frac{ab}{2d} \right) \right]. \quad (54)$$

Mesures réalisées en préparation avec l'évolution du contraste en fonction de la largeur de la fente source.

Plus généralement, le théorème de van Cittert-Zernike fait le lien entre l'allure spatiale de la source et le contraste de la figure d'interférence en faisant intervenir la transformée de Fourier spatiale de la source.

Application : mesure du diamètre angulaire d'une étoile.

17.3.3 Cohérence temporelle

On passe à une source non monochromatique avec une étendue spectrale $\Delta\nu$ finie. De la même façon qu'avec la cohérence spatiale, il existe une relation entre la transformée de Fourier du profil spectral de la source et l'évolution du contraste en fonction de la différence de marche (théorème de Wiener-Kintchine).

Schéma : modèle des trains d'onde avec petite et grande différence de marche.

Pour quantifier la cohérence temporelle de la source, on parle de temps de cohérence τ_c

$$\tau_c \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (55)$$

et de longueur de cohérence l_c

$$l_c = c\tau_c. \quad (56)$$

Conclusion

On a vu les conditions pour observer des interférences en optique, avec des limites importantes, liées à la cohérence limitée des sources communes. Ces limites se traduisent par une évolution du contraste de la figure d'interférence avec les propriétés de la source, ce qui peut être utilisé pour étudier les propriétés de la ou des source(s). Le laser permet de palier à ces limitations avec des cohérences spatiale et temporelle importantes, ce qui en fait un outils de choix pour des mesures extrêmement précises.

Liste du matériel

Interférence avec un laser :

- laser He-Ne vert ;
- banc optique (pour le confort d'utilisation) ;
- deux montures ;
- fente simple réglable ;
- fentes doubles (200, 300 et 500 μm) ;
- écran ;
- mètre règle ou autre ;
- barrette CCD.

Variation du contraste avec une source étendue :

- lampe quartz-iode (ou led) ;
- condenseur 8 cm ;
- calles en bois ;
- filtre anti-thermique ;
- banc optique ;
- six montures ;
- diaphragme ;
- deux fentes réglables ;
- fentes doubles ;
- écran.

18 LP18 Interférométrie à division d'amplitude

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

18.1 Template

18.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

19 LP19 Diffraction de Fraunhofer

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

19.1 Template

19.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

20 LP20 Diffraction par des structures périodiques

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

20.1 Template

20.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

21 LP21 Absorption et émission de la lumière

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

21.1 Template

21.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

22 LP22 Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

22.1 Template

22.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

23 LP23 Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

23.1 Template

23.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

24 LP24 Phénomène de résonance dans différents domaines de la physique

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

24.1 Template

24.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

25 LP25 Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

25.1 Template

25.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

26 LC01 Séparations, purifications, contrôles de pureté

Niveau :

Lycée

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

26.1 Template

26.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

27 LC02 Chimie durable

Niveau :

Lycée

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

27.1 Template

27.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

28 LC03 Synthèse inorganique

Niveau :

Lycée (STL - SPCL)

Prérequis :

- Constante d'équilibre
- Dosages par titrage, étalonnage
- Structure de Lewis
- Électrolyse

Objectif de la leçon : Décrire les interactions matière rayonnement avec les résultats de la mécanique quantique.

Expériences :

- Synthèse de l'eau de Javel par électrolyse de NaCl [10] p.337;
- Révélation de quelques cations métalliques de transition [9] p.263 ;
- Synthèse du complexe $K_3[Fe(C_2O_4)_3] \cdot 3H_2O$ [9] p.291.

Introduction

Par synthèse, on sous-entend le procédé permettant d'obtenir une nouvelle espèce chimique par transformation d'un ou plusieurs réactifs. Dans cette leçon on s'intéresse aux synthèses inorganiques, i.e. qui n'impliquent pas de modification d'un squelette carboné (qui relève du domaine de la chimie organique). Historiquement, c'est ce qu'on appelle la chimie minérale, même si ses frontières sont parfois ténues, notamment comme on le verra quand on s'intéresse à des complexes faisant intervenir des ligands organiques.

On s'intéressera tout d'abord à la synthèse de composés simples à travers l'exemple de la synthèse du dichlore, puis on introduira de nouveaux assemblages atomiques avec les complexes dont on verra un exemple de synthèse.

28.1 Synthèse du dichlore

28.1.1 Synthèse de l'eau de Javel en laboratoire

Un peu d'histoire :

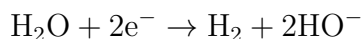
- ~ 1785 : blanchiment au dichlore ;
- Cl_2 obtenu par oxydation de l'acide chlorhydrique le dioxyde de manganèse



;

Schéma de la manip.

On peut synthétiser le dichlore par électrolyse de la saumure. Sur la cathode on observe la réduction de l'eau :



et sur l'anode l'oxydation des ions chlorure :



L'équation bilan de l'électrolyse est donc :

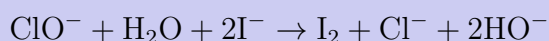


Sous agitation, on peut ainsi dissoudre le dichlore dans une solution basique qui conduit par dismutation à :



Synthèse du dichlore par électrolyse de la saumure.

- lancer l'électrolyse dès le début de la leçon ;
- mettre en évidence la formation de ClO^- avec l'iodure de potassium + empois d'amidon ;



- comparer à un prélèvement avant l'électrolyse et un prélèvement de la préparation.

Ce processus ne permet pas la production de dichlore à grande échelle. Qu'en est-il des méthodes de production industrielles ?

28.1.2 Synthèse industrielle

Le dichlore est un composé essentiel dans notre monde actuel.

- actuellement utilisé pour la synthèse de l'acide chlorydrique, du PVC, de fluides frigorigènes, pour le blanchiment de toiles, de papier, comme désinfectant, etc. ;
- production actuelle : 70 million de tonnes en 2017.

Synthèse industrielle de l'eau de Javel. La synthèse se fait en séparant les deux cellules : il faut assurer le transport des ions sodium pour la neutralité. Comparaison des différentes méthodes et un mot sur le réacteur ouvert.

Insister sur :

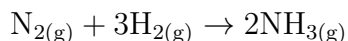
- matières premières ;
- sous produits ;
- énergie ;
- catalyseur ;
- sécurité.

On a vu que les méthodes de production s'efforcent d'être plus en accord avec les enjeux environnementaux de notre époque. Un autre exemple qui illustre cette préoccupation envers les problématiques environnementales est celui de la synthèse de l'ammoniac.

28.1.3 Vers des synthèses plus vertes

Production actuelle : plus de 100 millions de tonnes par an, utilisé dans les engrais, les explosifs, les carburants, polymères, etc. consomme entre 1 et 2 % de la consommation énergétique mondiale.

Sa synthèse repose sur le procédé Haber-Bosch développé au début du XX^e siècle, par réaction directe de diazote et dihydrogène en présence d'un catalyseur (Fer α), à haute température (450 °C) et haute pression (250 bar) :



L'idéal serait de parvenir à s'inspirer de la nature où l'on trouve de nombreuses plantes capables de réaliser cette transformation sans avoir besoin d'une telle énergie, par catalyse enzymatique.

La difficulté est de rompre la triple liaison du diazote. Pour cela, certains progrès récents proposent l'utilisation de complexes organométalliques.

Que sont les complexes et comment les synthétiser.

28.2 Les complexes

28.2.1 Mise en évidence

Un complexe est un édifice polyatomique formé d'un centre métallique (souvent un cation d'un métal de transition) autour duquel sont liés (coordonnées ou coordinés) des molécules ou anions appelés ligands.

Exemple de complexe.

L'ion central est un accepteur d'électrons :

- fer(II), fer(III) ;
- cuivre(I), cuivre(II) ;
- cobalt(II)...

alors que les ligands sont donneurs d'électrons, ce qui permet de former une ou plusieurs liaison(s) par partage de doublets non liants :

- eau H_2O
- ion cyanure CN^- ;
- ion oxalate $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$;
- ion thiocyanate SCN^- ...

Les complexes sont très souvent colorés.

Révélation de quelques cations métalliques de transition. ([9] p.263)

Révélation de quelques cations métalliques de transition

L'indice de coordination est le nombre de liaison(s) entre l'atome central et les ligands.

Exemple de ligands.

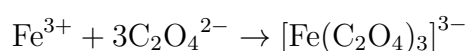
Pour quantifier le nombre de liaison que peut former un ligand avec le centre métallique, on parle de denticité du ligand :

- un ligand est monodentate s'il ne se lie au centre métallique que par un seul de ses atomes ;
- au contraire s'il se lie par plusieurs sites de fixation, on dit que le ligand est polydentate.

Comment peut-on synthétiser les complexes ?

28.2.2 Synthèse d'un complexe

On s'intéresse ici à la synthèse du complexe oxalatofer (III) :



La constante d'équilibre de cette réaction est appelée constante de formation globale du complexe β telle que

$$\beta = \frac{[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}(c^0)^3}{[\text{Fe}^{3+}][\text{C}_2\text{O}_4^{2-}]^3},$$

où $c^0 = 1 \text{ mol/L}$.

Synthèse du complexe $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

On a évoqué le rôle des complexes comme catalyseur, mais ils sont très souvent rencontrés en biochimie.

28.3 Complexes bioinorganiques

28.3.1 Transport de l'oxygène

Transport du dioxygène.

- Comment s'effectue le transport du dioxygène dans les hématies?

28.3.2 Un complexe en chimiothérapie

Le cisplatine en chimiothérapie.

- Chapitre 1, l'activité anticancéreuse du cisplatine (extrait de thèse)

Conclusion

29 LC04 Stratégies et sélectivité en synthèse organique

Niveau :

Lycée

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

29.1 Template

29.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

30 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

30.1 Template

30.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

31 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

31.1 Template

31.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

32 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

32.1 Template

32.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

33 LC08 Molécules de la santé

Niveau :

Lycée

Prérequis :

- Synthèse organique
- Méthodes de caractérisation
- Réaction d'oxydoréduction
- Dosages
- Spectroscopie RMN

Objectif de la leçon : Le but de cette leçon est de voir quelles sont les molécules de la santé, de comprendre comment elles agissent et enfin de découvrir quelques méthodes d'obtention de principes actifs.

Expériences :

- Synthèse du paracétamol [27], p145 ;
- Dosage du diiode de la bétadine [14], p468 ;
- Solubilité de différentes formulation de l'aspirine [4], p117 ;
- Catalyse de la dismutation de H_2O_2 .
- Extraction de l'eugénol.

Introduction

Les progrès de la médecine ont permis de rallonger considérablement notre espérance de vie. Jusqu'au XVIII^{ème} siècle, on se contentait essentiellement de ce que la nature pouvait apporter, mais à partir du XIX^{ème} siècle, les connaissances en chimie ont permis d'améliorer les substances utilisées. La chimie est ainsi réellement au cœur de ces développements comme nous allons le voir dans cette leçon. Actuellement l'industrie pharmaceutique est le sixième marché économique mondial derrière le pétrole, la nourriture, et les trafics de stupéfiant, d'arme et d'être humain.

L'objectif sera de voir quelles sont les molécules de la santé et quels sont les procédés d'obtention de ces composés. Nous verrons aussi le mode d'actions de certains de ces composés pour comprendre quels peuvent être leurs effets.

Quelques chiffres clés pour la France [22] :

- la France est au cinquième rang des marchés pharmaceutiques ;
- 8500 embauches par an ;
- 54,1 milliards d'euros de chiffre d'affaire ;
- 510 € pour la consommation moyenne par habitant.

33.1 La chimie au service de la santé

33.1.1 Action thérapeutique : les médicaments

Le paracétamol. Introduire les différentes définitions avec l'extrait de la notice.

Toutes ces définitions sont tirées de [38], p35.

La définition du mot médicament est fixée par une loi du 26/02/07 : « On entend par médicament toute substance ou composition présentée comme possédant des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies humaines ou animales [...] »

Un médicament contient au moins une substance active, appelée principe actif, connue pour prévenir ou guérir une maladie.

Les autres constituants d'un médicament sont appelés excipients. Ils servent à donner sa forme, son aspect, son goût mais aussi souvent à faciliter l'assimilation du principe actif.

Développement d'un médicament. Le brevet donne à celui qui le dépose une exclusivité de 20 ans sur l'exploitation du principe actif. Il faut entre 10 et 15 ans pour que le médicament arrive sur le marché ce qui donne entre 5 et 10 ans d'exclusivité au dépositaire du brevet pour la commercialisation du princeps avant que les génériques ne soit accessibles. On compte en général entre 8 et 10 ans de recherches et entre 1 et 3 ans pour l'autorisation de mise sur le marché (AMM).

Pour un même principe actif, il existe souvent différentes formes d'assimilation appelées formes galéniques. La formulation du médicament est choisie en vue d'une meilleure assimilation du principe actif. Elle dépend principalement des excipients.

pH du système digestif.

Solubilité de différentes formulations d'aspirine à différents pH. [4], p117.

L'exemple de l'aspirine est assez banal mais il existe des cas où des changements de formulation ont eu des conséquences importantes. C'est le cas du Levothyrox [13] dont un changement de la composition des excipients a entraîné une augmentation de la fréquence d'effets secondaires insupportables selon les patients. Ce médicament contient une hormone thyroïdienne et est prescrit dans le cas d'une déficience en thyroxine naturelle.

Le principe d'action du paracétamol n'est pas parfaitement connu mais, comme l'aspirine, il agirait en inhibant au niveau du système nerveux central la production de prostaglandines. Ce sont des métabolites impliqués dans les processus de la douleur et de la fièvre. L'aspirine agit sur l'hypothalamus, thermostat de la température corporelle.

L'apport de la chimie à la santé ne se limite pas seulement au développement de médicaments. On utilise souvent des substances destinées à l'assainissement.

33.1.2 Hygiène : antiseptiques et désinfectants

Définitions tirées de [3], p128.

Il s'agit de composés chimiques qui éliminent certains micro-organismes (virus, bactéries, champignons, spores), ou du moins qui ralentissent leur prolifération. Ils agissent par oxydation. On distingue les antiseptiques, qui empêchent la prolifération de ces germes dans les tissus vivants ou à leur surface, des désinfectants qui eux, tuent les germes présents en dehors de l'organisme :

- antiseptique : liquide de Dakin (ClO^- , MnO_4^-), Bétadine (I_2), eau oxygénée (H_2O_2) ;
- désinfectant : eau de Javel (ClO^-).

Le diiode est obtenu par réduction par le dioxyde de soufre des ions iodate IO_3^- contenus dans le minerai de caliche, sous forme d'iodate de calcium. Il peut être obtenu par oxydation de ions iodure issus des saumures extraites lors de l'exploitation de puits de pétrole.

Les ions hypochlorite sont obtenus à partir de la dismutation du dichlore dans la soude, lui même issu du procédé chlore soude (cf LC04).

Le peroxyde d'hydrogène est obtenu avec le procédé Riedl-Pfeiderer (1936) par barbotage d'air comprimé dans un dérivé d'anthraquinone.

Propriétés oxydantes du diiode. [14], p468. Montrer la décoloration d'une solution de diiode (Bétadine) par une solution de thiosulfate de sodium ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$).



Comme la leçon ne contient pas beaucoup de réaction, c'est peut-être le bon moment pour écrire proprement l'équation d'oxydoréduction. Les produits de la réaction sont les ions iodure et les ions tétrathionate.

Catalyse de la dismutation du peroxyde d'hydrogène par les ions Fe(II). H_2O_2 appartient à deux couples redox :

— $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ($E^0 = 1,78 \text{ V}$) : $\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = 2\text{H}_2\text{O}$;

— $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ ($E^0 = 0,697 \text{ V}$) : $\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}_2$.

La réaction de dismutation est thermodynamiquement favorable mais cinétiquement lente. Elle est catalysée par les ions Fe^{2+} . En plus de son action oxydante, le dégagement gazeux rapide en présence d'un catalyseur (Fe(II) contenu dans l'hémoglobine, enzymes), l'eau oxygénée a une action mécanique pour le nettoyage des plaies.

Les désinfectants agissent souvent par dénaturation des protéines. L'éthanol dénature les protéines cytoplasmiques et membranaires, et inhibe la synthèse des acides nucléiques et des protéines. Les oxydants produisent des radicaux libres qui interagissent avec les lipides, les protéines et l'ADN.

Il existe de nombreuses façons d'obtenir le principe actif d'un médicament.

33.2 Obtention du principe actif

33.2.1 Extraction de principes actifs

C'est la façon la plus simple d'obtenir un principe actif, parce qu'elle exploite directement les composés présents dans la nature. C'est donc la première méthode employée par l'homme : l'acide salicylique est ainsi employé depuis l'antiquité en l'extrayant de l'écorce de saule blanc. La seule difficulté est d'isoler le produit.

De multiples méthodes d'extraction. On peut citer :

- expression, macération, infusion, décoction ;
- l'hydrodistillation pour l'obtention d'huiles essentielles, avec l'exemple de la lavande ;
- extraction par solvant [38] : elle est réalisée en solubilisant l'espèce chimique à extraire dans un solvant.

Extraction de l'eugénol. [38].

Extraction de l'eugénol dans l'éther. En préparation, on aura réalisé une décoction ou une hydrodistillation de clous de girofle. Pendant la leçon on présente la phase d'extraction liquide-liquide de l'eugénol dans l'éther.

L'extraction de principes actifs disponibles dans la nature présente plusieurs limitations :

- on est limité aux composés produits par la nature ;
- il peut être difficile de s'approvisionner en matière première.

Pour améliorer l'efficacité des principes actifs il est souvent nécessaire de transformer des molécules pour en synthétiser de nouvelles.

33.2.2 Synthèse du paracétamol

Le paracétamol est obtenu par addition nucléophile à partir du 4-aminophénol (ou paraaminophénol ou 4-hydroxyaniline) et de l'anhydride acétique. La réaction produit aussi de l'acide acétique, utilisé comme solvant dans cette synthèse.

Synthèse du paracétamol – Équation de réaction.

Le paraaminophénol est obtenu par nitration du phénol. Le phénol est obtenu grâce au procédé au cumène (Hock 1944), à partir de benzène, de propylène et du dioxygène de l'air. Les réactifs alors dérivés de la pétrochimie (le cumène peut être lui même obtenu de la pétrochimie) et le procédé forme aussi de l'acétone.

Synthèse du paracétamol. [27], p145. Lancer le goutte à goutte d'anhydride acétique au début de la leçon et mettre dans la glace au début de la deuxième partie. On présente la phase d'essorage sur buchner. Les contrôles seront effectués plus tard.

Synthèse du paracétamol – Montage.

On souhaite vérifier que le produit synthétisé est le bon et qu'il est pur. Dans cette synthèse par exemple le paraaminophénol est toxique et cancérigène. Pour éviter des problèmes sanitaires, il est importants d'effectuer des contrôles qualité.

33.3 Contrôle qualité

33.3.1 Identification, vérification de la pureté

En préparation, on a mesuré la température de fusion du produit obtenu après synthèse et séchage. La température obtenue est plus faible que la température tabulée ce qui indique la présence d'impuretés. Une recristallisation a été réalisée pour purifier le produit.

Contrôle du paracétamol synthétisé. Montrer une plaque CCM réalisée en préparation avec produit synthétisé, paracétamol commercial, paraaminophénol et codépôt. Mesure de la température de fusion du produit recristallisé (impossible d'utiliser le produit récupéré à la phase précédente car il nécessite un séchage). On peut aussi acquérir le spectre IR du produit et le comparer aux spectres tabulés ou du produit commercial.

La pureté n'est pas le seul critère qui importe. Le dosage est aussi fondamental pour éviter des erreurs de posologie.

33.3.2 Dosage

On souhaite vérifier l'information donnée par le fabricant sur la concentration en diiode dans une solution commerciale de diiode.

Dosage du diiode contenu dans la Bétadine par les ions thiosulfate. [14], p468. Faire le dosage complet à partir des solutions réalisées en préparation. Le suivi de l'avancement se fait par colorimétrie.

Dosage du diiode de la Bétadine.

Conclusion

La chimie au service de la santé.

On peut ouvrir sur l'importance de la configuration spatiale des molécules avec l'exemple de la thalidomide commercialisée dans les années 1950 :

- la forme (R) protège contre les nausées, les tumeurs et les syndromes inflammatoires ;
- la forme (S) est tératogène (source de malformation fœtales).

34 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

34.1 Template

34.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

35 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

35.1 Template

35.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

36 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon : Template

Introduction

36.1 Template

36.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

37 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

37.1 Template

37.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

38 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

38.1 Template

38.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

39 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

39.1 Template

39.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

40 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

40.1 Template

40.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

41 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

41.1 Template

41.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

42 LX00 Template

Niveau :

Template

Prérequis :

- Template
- Template

Objectif de la leçon :

Template

Introduction

42.1 Template

42.1.1 Template

Template

Template

Template

Template

43 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

43.1 Template

43.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

44 LX00 Template

<div>Niveau :</div> <div>Template</div>	<div>Prérequis :</div> <div><ul style="list-style-type: none">• Template• Template</div>
<div>Objectif de la leçon :</div> <div>Template</div>	

Introduction

44.1 Template

44.1.1 Template

Template
Template
Template
Template

Références

- [1] Conversion électro-magnéto-mécanique. Polycopié.
- [2] D. Augier and C. More. *Le tout-en-1 Physique MP/MP**. Lavoisier, edition, 2014.
- [3] J.-L. Azan. *Physique Chimie 1re STI2D, 1re STL*. Nathan edition, 2011.
- [4] X. Bataille. *physique chimie 2e*. Belin edition, 2010.
- [5] M. Bertin, J.-P. Faroux, and J. Renault. *Electromagnétisme 1*. Dunod edition, 1984.
- [6] M. Bertin, J.-P. Faroux, and J. Renault. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod edition, 1986.
- [7] L. Bocquet, J.-P. Faroux, and J. Renault. *Toute la Mécanique*. Dunod edition, 2002.
- [8] J.-M. Brébec, T. Desmarais, A. Favier, M. Ménétrier, B. Noël, R. Noël, C. Orsini, and J.-M. Vanhaecke. *HPrépa, Ondes 2e année*. Hachette s edition, 2004.
- [9] P.-D. Buchère. *Epreuve orale de chimie*. Dunod edition, 2017.
- [10] D. Cachau-Hereillat. *Des expériences de la famille Réd-Ox*. De boeck edition, 2011.
- [11] S. Cardini, E. Ehrhard, A. Guerillot, T. Guillot, B. Morvan, and M.-N. Sanz. *Tout en Un Physique PSI/PSI**. Dunod edition, 2017.
- [12] A. Chaigne and J. Kergomard. *Acoustique des instruments de musique*. Belin edition, 2008.
- [13] A. de Saint-Circq. Levothyrox, 2018. Levothyrox.
- [14] T. Dulaurans and A. Durupthy. *Physique Chimie Ts Enseignement spécifique*. Hachette edition, 2012.
- [15] Eurochlor. How are chlorine and caustic soda made ?, 2017. How are chlorine and caustic soda made?
- [16] J.-P. Faroux and J. Renault. *Electromagnétisme 1*. Dunod edition, 1996.
- [17] J.-P. Faroux and J. Renault. *Electromagnétisme 2*. Dunod edition, 1998.
- [18] J.-P. Faroux and J. Renault. *Optique et physique ondulatoire*. Dunod edition, 1999.
- [19] B. Fosset, J.-B. Baudin, and F. Lahitète. *Tout en Un Chimie PC-PC**. Dunod edition, 2014.
- [20] B. Fosset, J.-B. Baudin, and F. Lahitète. *Tout en Un Chimie PCSI*. Dunod edition, 2016.
- [21] Gouvernement. Bulletin officiel, 2017. Bulletin officiel.
- [22] GuidePharmaSanté. Les chiffres-clés du marché du médicament, 2017. Les chiffres-clés du marché du médicament.
- [23] L. Landau and E. Lifschitz. *Mécanique*. Mir edition, 1969.
- [24] L. Landau and E. Lifschitz. *Course of theoretical physics, Fluid mechanics*. 1971.
- [25] L'élémentarium. Production industrielle de l'eau de javel, 2017. Production industrielle de l'eau de Javel.
- [26] B. Mashhoon. Gravitoelectromagnetism : A brief review. *The Measurement of Gravito-magnetism : A Challenging Enterprise*, pages 29–39, 2007.
- [27] J. Mesplède and C. Saluzzo. *100 manipulations de chimie*. Bréal edition, 2002.
- [28] R. Metzdorff. Verre vibrant, 2017. Vidéo.
- [29] G. Michel, A. Raoux, P. Tondelier, and E. Van Brackel. *Tout-en-un Physique, PCSI*. de boeck edition, 2017.
- [30] R. Moreau. Propagation guidée des ondes acoustiques dans l'air. *BUP*, 742, 1992.

- [31] P. Morse and U. Ingard. *Theoretical acoustics*. 1986.
- [32] E. nationale. Livre numérique de terminal stl, 2018. Livre numérique de Terminal STL.
- [33] J. Neveu. *Electronique*. 2019.
- [34] J. Neveu. *Moteurs et transformateurs électriques*. 2019.
- [35] S. Olivier, H. Gié, and J.-P. Sarmant. *Physique Spé. PC*, PC*. Tec&doc edition, 2000.
- [36] J.-P. Pérez. *Optique, Fondements et applications*. Dunod edition, 2017.
- [37] J.-P. Pérez, R. Carles, and R. Fleckinger. *Electromagnétisme, Fondements et applications*. Dunod edition, 2009.
- [38] V. Prévost. *Physique Chimie 2de*. Nathan edition, 2017.
- [39] B. Salamito, S. Cardini, D. Jurine, and M.-N. Sanz. *Tout en Un Physique PCSI*. Dunod edition, 2016.
- [40] B. Salamito, M.-N. Sanz, F. Vandenbrouck, and M. Tuloup. *Tout en Un Physique MP/MP**. Dunod edition, 2017.
- [41] M.-N. Sanz, F. Vandenbrouck, B. Salamito, and D. Chardon. *Tout en Un Physique PC-PC**. Dunod edition, 2016.
- [42] N. J. Stanford. Cymatics, 2014. Vidéo (3'12" à 3'52").
- [43] E. Thibierge. Propagation des ondes, 2014. Polycopié.