

SESSION DE 2008

---

**CONCOURS INTERNE  
DE RECRUTEMENT DE PROFESSEURS AGRÉGÉS  
ET CONCOURS D'ACCÈS A L'ÉCHELLE DE RÉMUNÉRATION**

**Section : SCIENCES PHYSIQUES**

**Option : PHYSIQUE ET CHIMIE**

COMPOSITION SUR LA PHYSIQUE  
ET LE TRAITEMENT AUTOMATISÉ  
DE L'INFORMATION

Durée : 5 heures

---

*Calculatrice électronique de poche – y compris programmable, alphanumérique ou à écran graphique -, à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n°99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : Hormis l'en-tête détachable, la copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

**Tournez la page S.V.P.**

Les lidars sont des systèmes laser copiés sur les radars permettant de détecter à distance des objets ou des structures qui réfléchissent, ou rétrodiffusent, de la lumière. Un laser émet une brève et intense impulsion lumineuse, et le système détecte et analyse l'onde lumineuse partiellement rétrodiffusée par la cible.

Comme leurs prédécesseurs radio, les lidars ont été initialement développés à des fins militaires, mais leur champ d'applications s'est depuis plusieurs années étendu au domaine civil, de la mesure de distance sur chantiers de travaux publics, aux applications météorologiques.

Ce problème est dédié à l'étude de quelques questions de physique qui se posent autour de ces dispositifs. Ses différentes parties sont assez largement indépendantes, les résultats des unes pouvant être admis dans les autres. En introduction des parties "ondes électromagnétiques" et "ondes sonores", nous nous intéresserons à quelques aspects de la mise en œuvre de l'enseignement correspondant au lycée.

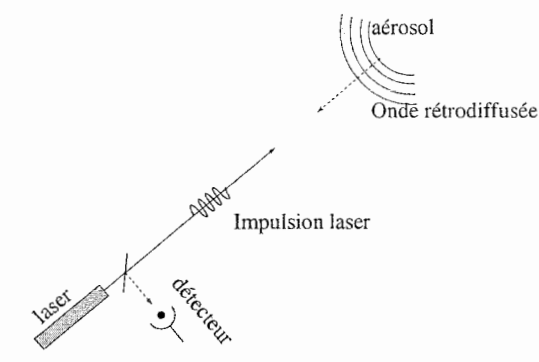


FIG. 1 : Exemple de lidar : le lidar vent. Un laser envoie vers le ciel une impulsion brève et intense. Cette impulsion est partiellement rétrodiffusée par les aérosols de l'atmosphère. L'onde rétrodiffusée détectée par le lidar, porte des informations sur les propriétés de l'atmosphère.

# 1 Ondes Électromagnétiques

## 1.1 Ondes électromagnétiques au lycée

### 1.1.1 Comparaison des différentes ondes rencontrées

1. Sur quelles principales différences entre les ondes électromagnétiques et les ondes sonores insisteriez vous devant vos élèves ?
2. Proposer une expérience de cours permettant de mettre facilement en évidence une de ces différences.

### 1.1.2 Sources lumineuses utilisées en travaux pratiques

Parmi les sources lumineuses utilisées dans les lycées figurent en bonne place les diodes laser rouge et les lasers HeNe.

3. Rappeler la signification de l'acronyme LASER et la date à laquelle est apparu le premier laser.
4. Donner les caractéristiques du rayonnement laser.
5. Citer des expériences d'enseignement qui sont facilitées par l'utilisation d'un laser ou pour lesquelles un laser présente un (des) avantage(s) par rapport à l'utilisation d'autres sources de lumière. Précisez à chaque fois quelles sont les caractéristiques du rayonnement laser qui sont mises à profit.
6. Les élèves posent parfois les questions suivantes :
  - Quelle différence y a-t-il entre la diode laser rouge utilisée en travaux pratiques d'optique et la LED qui est utilisée dans les montages d'électricité ?
  - Et entre la diode laser ( qu'ils utilisent ) et le laser HeNe ( utilisé par le professeur ) ?Rédigez en quelques lignes les explications qu'il est possible de donner à des élèves de seconde. Que peut-on dire de plus à des élèves de terminale scientifique ?

## 1.2 Propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide

### 1.2.1 Équation de propagation

7. Écrire les équations de Maxwell. On notera  $\rho$  la densité volumique de charge et  $\mathbf{j}$  le vecteur densité de courant électrique.
8. Montrer qu'en l'absence de toute charge et courant, le champ électromagnétique est solution des *équations de propagation* :

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (2)$$

et préciser le lien qui existe entre  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{B}$ .

9. Montrer que les équations de propagation admettent des solutions en *ondes planes monochromatiques* où le champ électrique est donné par :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \mathbf{u} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad (3)$$

où  $\mathbf{u}$  est un vecteur unitaire.

10. Préciser dans ce cas particulier l'expression du champ magnétique.

11. Préciser la relation entre  $\omega$  et  $\mathbf{k}$ . Donner quelques exemples numériques de valeur de  $\omega$  en précisant pour chacun le domaine physique ou technologique concerné.
12. Expliquer la dénomination *plane* pour cette onde.
13. Expliquer de même le terme *monochromatique*.
14. Une onde plane peut-elle ne pas être monochromatique ?
15. Donner l'interprétation du vecteur  $\mathbf{u}$ .
16. Proposer une expérience de cours mettant en évidence le caractère vectoriel des ondes électromagnétiques.

### 1.2.2 Aspect énergétique

On appelle *vecteur de Poynting*  $\mathbf{R}$  le vecteur densité de courant d'énergie électromagnétique, on admettra que ce vecteur est donné par :

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{E} \wedge \mathbf{B}}{\mu_0} \quad (4)$$

17. Proposer une expérience de cours montrant qu'une onde électromagnétique transporte de l'énergie.
18. On appelle *intensité* d'une onde électromagnétique, notée  $I$ , la puissance moyenne (sur quelques périodes) qu'elle transporte à travers une section droite d'aire unité. Exprimer l'intensité de l'onde décrite par l'équation (3) en fonction de  $E_0$ .

### 1.2.3 Milieux diélectriques

19. Qu'appelle-t-on un milieu diélectrique ?
20. Comparer la distance caractéristique qui sépare les charges dans un milieu diélectrique et la longueur d'onde typique de la lumière.
21. En déduire une justification de l'approximation mésoscopique du champ macroscopique : on remplace les champs électrique et magnétique réels par leur moyenne sur un volume de taille intermédiaire.

Dans cette approximation, la densité de charge qui intervient dans les équations de Maxwell apparaît comme la divergence du *vecteur polarisation* ( $\rho = -\operatorname{div} \mathcal{P}$ ) dont on admettra ici (milieu linéaire isotrope) qu'il peut s'écrire :

$$\mathcal{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\mathbf{E} \quad (5)$$

où  $\varepsilon_r$  est une constante appelée *permittivité diélectrique relative* du milieu. Si de plus le milieu est non magnétique et suffisamment homogène, l'équation de propagation (1) devient simplement :

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (6)$$

avec  $n^2 = \varepsilon_r$

22. Que représente  $n$  ?
23. Cette équation peut-elle représenter la propagation de rayons X dans un milieu matériel ? (Justifiez votre réponse)

## 2 Ondes sonores

### 2.1 Ondes au lycée

Pour répondre aux questions de cette partie il peut être utile de consulter les extraits des programmes des classes de seconde, premières S et terminale S figurant en annexes (1, 2 et 3).

#### 2.1.1 Utilisation des ultrasons en travaux pratiques

Dans les séances de travaux pratiques les élèves sont amenés à utiliser des transducteurs piézoélectriques pour produire et détecter des ultrasons.

1. La réception des ultrasons fait appel à l'effet piézoélectrique et l'émission à l'effet piézoélectrique inverse. Décrire brièvement les phénomènes physiques correspondant à ces deux effets en précisant quelle est la nature du transducteur.
2. Quelle réponse apporter à un élève de terminale S qui demande quelle est la différence entre le transducteur piézoélectrique et le haut-parleur dont le principe de fonctionnement a été vu en classe de première S ? À l'aide d'un schéma clair rappeler au préalable le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique.
3. L'émission et la réception de salves d'ultrasons utilisées dans les TP de terminale S peuvent aussi être utilisées en classe de seconde avec une problématique identique ou différente. Préciser pour chacun des niveaux la (les) problématique(s) envisageable(s) compte tenu des programmes.
4. Quelles sont les caractéristiques d'une onde ultrasonore qui doivent être connues d'un élève de terminale S ?

#### 2.1.2 Étude des ondes en terminale S, organisation de la progression

La première partie du programme de physique de la classe de terminale S s'intitule : "Propagation d'une onde ; ondes progressives". Les instructions officielles prévoient deux séances de travaux pratiques ( durée 2 heures ). Un extrait de cahier de textes donne un exemple de progression suivie pour traiter cette partie du programme ( annexe 4 ).

5. Planifier la première séance de TP en précisant les objectifs visés et le scénario pédagogique choisi. ( Il est possible mais non obligatoire d'envisager que certaines expériences soient réalisées par le professeur pour introduire les manipulations des élèves)
6. Dans cette première séance de TP, citer les principales capacités expérimentales à faire acquérir aux élèves.
7. Indiquer éventuellement les difficultés que peuvent rencontrer les élèves dans l'utilisation du matériel prévu. Comment le professeur peut-il y remédier ?
8. Planifier un contenu associé à un scénario pédagogique permettant d'articuler la deuxième séance de TP avec les cours faits et à faire.
9. Dans cette seconde séance de TP, citer les principales capacités expérimentales à faire acquérir aux élèves.

#### 2.1.3 Évaluation de capacités expérimentales

10. Dans le but d'évaluer quelques capacités expérimentales parmi celles précédemment citées, élaborer le plan d'un contrôle d'une heure dans l'esprit de l'épreuve d'évaluation du bac S. Il conviendra de préciser l'objectif de la manipulation proposée aux élèves, les capacités qui seront évaluées pendant la manipulation et les réponses attendues dans le compte rendu rédigé par chaque élève.

Dans la suite, nous allons aborder l'étude théorique des ondes de densité et de pression qui peuvent se propager dans un milieu compressible comme un gaz. Dans un premier temps nous ne considérerons que des transformations réversibles et établirons l'équation de propagation des ondes dans l'approximation acoustique, et nous en examinerons l'aspect énergétique. Dans un deuxième temps nous prendrons en compte le caractère irréversible des transformations que subit le milieu lors du passage de l'onde et montrerons que cette irréversibilité est responsable d'une atténuation de l'onde.

## 2.2 Propagation

On considère un milieu compressible, comme un gaz, de masse volumique  $\rho_0$ , et soumis à une pression uniforme  $p_0$  dans laquelle se propage dans la direction  $z$  une onde plane. Sous l'action de cette onde, le milieu se déforme, la masse volumique devient  $\rho(z, t) = \rho_0 + \eta(z, t)$  et la pression devient  $p(z, t) = p_0 + \pi(z, t)$ .

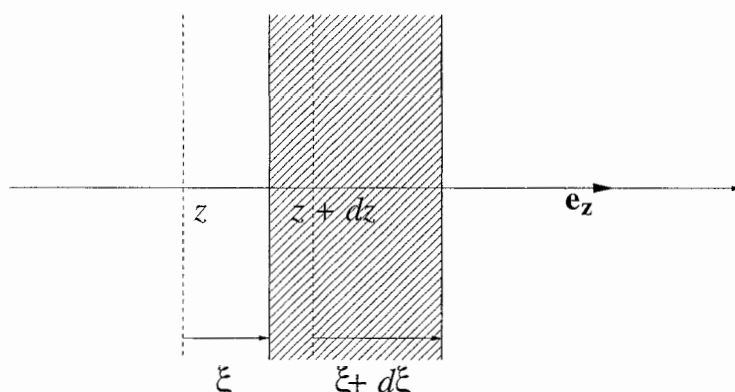


FIG. 2: Déplacement d'une tranche du milieu sous l'action d'une onde sonore.

Pour décrire la déformation du milieu, nous allons isoler par la pensée une tranche d'épaisseur infinitésimale  $dz$  et nous écrirons que cette tranche est déplacée de  $\xi(z, t)$ . Nous emploierons pour décrire la géométrie du problème les notations de la figure 2, de telle sorte qu'en même temps qu'elle est déplacée la tranche voit son épaisseur passer de  $dz$  à  $dz + d\xi$ . On pourra introduire la vitesse de la tranche  $\mathbf{v} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \mathbf{e}_z$  où  $\mathbf{e}_z$  est un vecteur unitaire selon  $z$ .

11. Calculer la force qui s'exerce sur la tranche de milieu par unité de surface, et montrer qu'elle vaut :

$$dF = - \left. \frac{\partial \pi}{\partial z} \right|_{z+\xi} \left( 1 + \frac{\partial \xi}{\partial z} \right) dz \quad (7)$$

12. Montrer qu'elle vaut aussi (à des infiniment petits d'ordre  $dz^2$  près) :

$$dF = \rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} dz \quad (8)$$

On appelle  $\chi$  la *compressibilité adiabatique du milieu* :

$$\chi = - \frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial p} \right|_S \quad (9)$$

où l'indice  $S$  signifie "à entropie constante".

13. Justifier que lors du passage d'une onde sonore, on peut considérer la transformation que subit le milieu comme adiabatique.
14. Montrer alors que :

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\frac{1}{\chi} \frac{\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2}}{1 + \frac{\partial \xi}{\partial z}} \quad (10)$$

Dans toute la suite du problème, nous ferons l'approximation acoustique consistant à négliger dans les équations  $\partial \xi / \partial z$  devant 1.

15. Expliquer sans calcul la signification physique de cette approximation.
16. Dans le cadre de cette approximation, déduire des équations précédentes l'équation de propagation des ondes acoustiques :

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0 \quad (11)$$

17. Donner l'expression de  $C$ . Que représente cette grandeur ?
18. Donner sa valeur en fonction des grandeurs pertinentes pour un gaz parfait et faire l'application numérique dans le cas de l'air à température ambiante.

### 2.3 Aspects énergétiques

Quiconque a déjà fait cours dans une classe sait qu'il faut dépenser du travail pour parler fort. Une des raisons est qu'une onde sonore transporte de l'énergie, c'est ce que nous allons étudier ici.

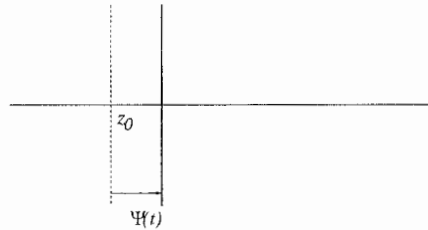


FIG. 3 : On place un piston dans le milieu. Au passage de l'onde il se déplace de  $\Psi(t)$ .

À cet effet imaginons un piston sans masse, d'extension transverse suffisamment grande pour qu'on puisse négliger les effets de bord, placé perpendiculairement à la direction de propagation d'une onde sonore à l'abscisse  $z = z_0$  comme illustré figure 3.

19. Le piston va se déplacer lorsque l'onde passe. Justifier que s'il est sans masse, il ne perturbera pas l'onde.
20. Appelons  $\Psi(t)$  son déplacement. Relier  $\Psi$  et  $\xi$ .

On fait le vide à gauche du piston, et un opérateur maintient le piston en position.

21. Justifier que si l'opérateur imprime au piston un mouvement caractérisé par le même déplacement  $\Psi(t)$  que dans la situation précédente, une onde identique à la précédente se propagera à droite du piston.
22. Pourquoi dans ces conditions aucune onde ne se propage-t-elle vers la gauche ?
23. Calculer la force  $F(t)$  que l'opérateur doit exercer par unité de surface du piston pour imposer le déplacement  $\Psi(t)$ .

24. On suppose pour simplifier les calculs que le déplacement du piston est sinusoïdal de pulsation  $\Omega$  :

$$\Psi(t) = \Psi_0 \cos \Omega t \quad (12)$$

Calculer alors la puissance mécanique moyenne par unité de surface  $\langle \mathcal{P} \rangle$  que l'opérateur doit dépenser pendant une période de l'onde.

25. On suppose que le déplacement est la somme de deux fonctions sinusoïdales de pulsations  $\Omega_1$  et  $\Omega_2$ . La puissance qui correspondrait à chacun de ces deux déplacements serait respectivement  $\langle \mathcal{P} \rangle_1$  et  $\langle \mathcal{P} \rangle_2$ . Montrer que la puissance est alors  $\langle \mathcal{P} \rangle_1 + \langle \mathcal{P} \rangle_2$ .
26. En déduire que dans l'approximation acoustique, la puissance que doit fournir l'opérateur pour imprimer un mouvement quelconque (mais physiquement réaliste) est donnée par :

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \rho_0 C \left\langle \left( \frac{d\Psi}{dt} \right)^2 \right\rangle \quad (13)$$

où on a introduit la vitesse quadratique moyenne de déplacement du piston.

Considérons maintenant un élément de volume  $dV$  du milieu d'extension petite devant la longueur d'onde de la perturbation sonore. Lors du passage de l'onde, cet élément de volume du milieu est comprimé (ou déprimé) et mis en mouvement.

27. Exprimer l'énergie cinétique de l'élément de volume. (on appellera  $v$  sa vitesse)
28. Calculer de même son énergie potentielle de compression.
29. Montrer en utilisant le fait que la pression moyenne est  $p_0$  que l'énergie totale moyenne de l'élément de volume est :

$$d\langle U \rangle = dU_0 + \frac{1}{2} \chi \langle \pi^2 \rangle dV + \frac{1}{2} \rho_0 \langle v^2 \rangle dV \quad (14)$$

où  $dU_0$  est son énergie interne de constitution.

30. Justifier que les résultats précédents conduisent à l'image que l'onde sonore transporte à la vitesse  $C$  une densité d'énergie sonore donnée par :

$$\mathcal{U} = \rho_0 \langle v^2 \rangle \quad (15)$$

$$= \chi \langle \pi^2 \rangle \quad (16)$$

31. Dans le cas particulier d'une onde sinusoïdale de pulsation  $\Omega$  et d'amplitude  $\xi_0$ , montrer que cette densité volumique d'énergie sonore devient :

$$\mathcal{U} = \frac{1}{2} \rho_0 \Omega^2 \xi_0^2 \quad (17)$$

## 2.4 Atténuation du son

Intéressons nous à une tranche donnée de milieu. Lors du passage de l'onde acoustique (on suppose toujours qu'elle se propage selon l'axe  $Oz$ ) cette tranche subit une alternance de phases de compression et de détente. Cette alternance conduit à une variation alternative de la température de la tranche. Dans les questions précédentes, nous avons considéré que cette transformation était adiabatique. Nous allons ici étudier les conséquences du relâchement de cette hypothèse et admettre que de la chaleur peut s'échanger d'une tranche à l'autre.

On rappelle que tous les calculs abordés ici sont effectués dans le cadre de l'approximation acoustique.

32. Expliquer qualitativement ce que devient l'énergie acoustique d'une onde lors de son atténuation.



33. Dans le cas où le milieu est un gaz parfait, explicitez comment, dans le cadre de l'approximation acoustique, la température dépend de la pression.
34. Dans le cas général, on définit le coefficient d'échauffement adiabatique :

$$\beta = \left. \frac{\partial T}{\partial p} \right|_S \quad (18)$$

Écrire alors la température du milieu  $T(z)$  à un instant  $t$  donné.

35. La conduction de la chaleur est supposée régie par la loi de Fourier :

$$j_Q = -D \frac{\partial T}{\partial z} \quad (19)$$

où on a introduit le coefficient de diffusion thermique  $D$ . Commenter cette équation.

36. Prenons le cas d'une onde sinusoïdale, de longueur d'onde  $\Lambda$ . À un instant donné, la température est alors une fonction sinusoïdale de l'abscisse, de période spatiale  $\Lambda$  :  $T(z) = T_0 + T_1 \cos(2\pi z/\Lambda + \phi)$ . Donner l'expression en fonction de  $z$  du courant thermique associé.
37. Quelle propriété commune de la conduction de la chaleur et de l'atténuation de l'onde permet de relier l'une à l'autre ?
38. Préciser sans calcul quelles ondes vont être atténuées le plus vite : celles de haute fréquence, ou celles de basse fréquence ?

Globalement, la diffusion de la chaleur va contribuer à un échauffement moyen du milieu, conséquence d'une transformation d'énergie cinétique et de compression en énergie interne. Pour prendre ce phénomène en compte, il nous faut préciser la thermodynamique de la transformation.

On s'intéresse donc à un élément du milieu de masse  $dm$  et de volume  $dV$  soumis à l'onde sonore *supposée de faible amplitude*.

39. Montrer que la chaleur qu'il reçoit pendant le temps  $dt$  est donnée par :

$$\delta Q = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial T}{\partial z} \right) \frac{dm}{\rho} dt \quad (20)$$

40. Montrer de même que sa variation de volume est donnée par

$$\delta(dV) = \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dm}{\rho} dt \quad (21)$$

41. Montrer que le premier principe de la thermodynamique appliqué à un élément de milieu de masse  $dm$  donne :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial T}{\partial z} \right) - p \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \quad (22)$$

où l'on a introduit la densité d'énergie interne par unité de masse  $u$  (l'énergie interne d'un élément de milieu de masse  $dm$  est  $u dm$ ) et où  $v_z$  représente comme précédemment la vitesse de déplacement du milieu due à l'onde.

42. On introduit de même la densité d'entropie par unité de masse  $s$ . Montrer que l'on a :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = T \frac{\partial s}{\partial t} - \frac{1}{\rho} p \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (23)$$

43. En déduire que la variation de la densité d'entropie est donnée par :

$$\rho \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{D}{T^2} \left| \frac{\partial T}{\partial z} \right|^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{D}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (24)$$

44. Quelle interprétation physique donnez vous à chacun des deux termes de l'équation (24) ?

Supposons que l'onde acoustique soit limitée dans le temps, et donc dans l'espace : c'est un *train d'onde* de longueur  $l$ .

45. En intégrant l'équation (24) sur un volume judicieusement choisi, montrer que l'entropie massique du milieu moyennée sur quelques périodes de l'onde augmente au cours du temps.

46. En déduire comment évolue la température moyenne et montrer que l'onde est donc atténuée.

### 3 Interaction d'une onde électromagnétique avec une onde sonore

On va dans cette section étudier comment la présence d'une onde sonore modifie la propagation d'une onde électromagnétique. Par rapport à la situation présentée en fin de section 1.2.3, le milieu n'est plus homogène.

On suppose donc que notre milieu diélectrique est parcouru par une onde sonore qui modifie la densité d'atomes et entraîne donc une modification de l'indice du milieu :

$$n(\mathbf{r}, t) = n_0 + n_1(\mathbf{r}, t) \quad (25)$$

Dans toute la suite, on considérera des ondes sonores de pulsation  $\Omega$  beaucoup plus petite que la pulsation  $\omega$  de l'onde électromagnétique incidente, on pourra donc en général considérer que le motif  $n(\mathbf{r})$  dû à la présence de l'onde sonore est figé pendant que l'onde électromagnétique le traverse. On fera cependant attention, qu'à cause de la grande différence de célérité des ondes sonores et électromagnétiques, les longueurs d'onde sonores et électromagnétiques peuvent, elles, être du même ordre de grandeur.

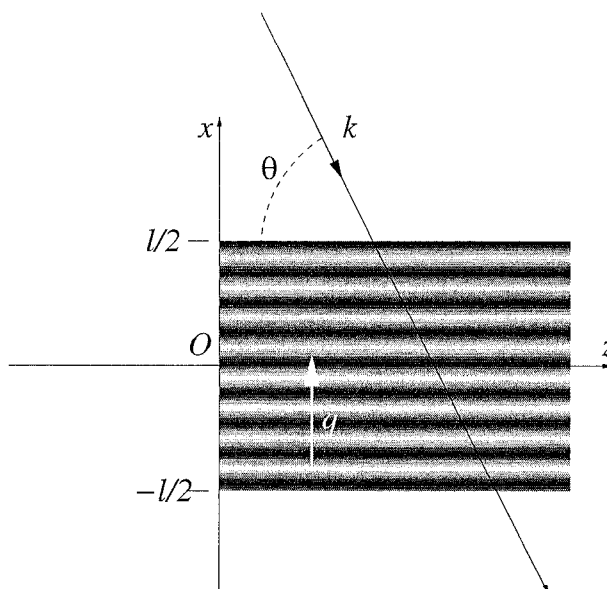


FIG. 4 : Interaction d'une onde lumineuse avec une onde sonore :  $\mathbf{k}$  est le vecteur d'onde de la lumière et  $\mathbf{q}$  celui de l'onde sonore de longueur d'onde  $\Lambda$ .

#### 3.1 Régime de Bragg

Considérons une tranche de milieu diélectrique d'épaisseur  $l$  dans la direction  $Ox$  traversée par une onde lumineuse de pulsation  $\omega$  de longueur d'onde dans le milieu  $\lambda$  et donc de vecteur d'onde (dans le milieu)  $\mathbf{k} = n\omega/c \mathbf{e}_k$ , et dans laquelle se propage aussi une onde sonore dans la direction  $Ox$ . On appellera  $\Omega$  la pulsation de l'onde sonore et  $\Lambda$  sa longueur d'onde. On introduira le vecteur d'onde correspondant  $\mathbf{q} = 2\pi/\Lambda \mathbf{e}_x$  :

$$n_1(\mathbf{r}, t) = n_1 \cos(\Omega t - qx + \varphi) \quad (26)$$

Pour fixer les idées, on prendra lorsque cela sera utile une onde sonore de fréquence 80 MHz et une onde lumineuse de longueur d'onde (dans le vide) 532 nm.

Pour décrire cette situation, nous allons considérer en fait le milieu comme une succession continue de dioptries représentant la variation d'indice dans la direction  $x$ . Chacun de ces dioptries

élémentaires réfléchit une partie de l'onde lumineuse incidente, et l'addition de toutes ces ondes élémentaires représentera une onde lumineuse *réfléchie par l'onde sonore*.

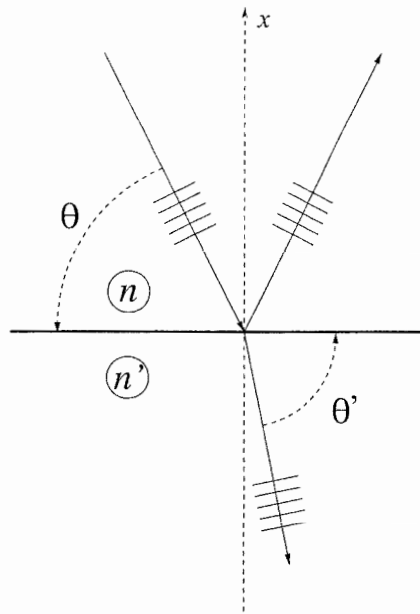


FIG. 5 : Réflexion d'une onde lumineuse par un dioptre. **Attention** on notera que les angles ne sont pas définis selon la convention habituelle.

### 3.1.1 Réflexion par un dioptre

On considère la situation décrite par la figure 5 où une onde lumineuse plane rencontre un dioptre séparant deux milieux homogènes d'indices respectifs  $n$  et  $n'$ .

1. Rappeler rapidement les lois de Descartes relatives à la réflexion et à la réfraction par le dioptre.

On rappelle les expressions de Fresnel donnant les coefficients de réflexion en amplitude pour une onde d'incidence  $\theta$  (on note  $\theta'$  l'angle d'émergence) définie comme sur la figure 5 :

$$r_{\perp} = \frac{n \sin \theta - n' \sin \theta'}{n \sin \theta + n' \sin \theta'} \quad r_{//} = \frac{n' \sin \theta - n \sin \theta'}{n' \sin \theta + n \sin \theta'} \quad (27)$$

où les indices  $\perp$  et  $//$  indiquent une polarisation respectivement perpendiculaire ou parallèle au plan d'incidence.

2. Donner un exemple d'application pratique de la dépendance de ces coefficients dans la polarisation.
3. Ces expressions sont-elles valables pour toutes valeurs de  $\theta$  ou  $\theta'$  ?

### 3.1.2 Réflexion par un faible saut d'indice

On se place dans le cas particulier où la différence d'indice de part et d'autre du dioptre est très faible. On note alors  $n$  l'indice d'un côté du dioptre et  $n + \delta n$  l'indice de l'autre côté. De même on note l'angle par rapport au dioptre  $\theta$  et  $\theta + \delta \theta$ .

4. Que devient la loi de Descartes pour la réfraction dans ce cas ? Montrer qu'elle donne :

$$\delta \theta = \frac{\delta n}{n} \frac{1}{\tan \theta} \quad (28)$$

5. En déduire les expressions des coefficients de réflexion.
6. Montrer que dans le cas où l'incidence est rasante, l'amplitude réfléchie est indépendante de la polarisation.

### 3.1.3 Réflexion par une variation d'indice

On suppose que l'indice dépend continuellement de la cote  $x$ .

7. Montrer qu'une tranche d'épaisseur  $\delta x$  contribue à la réflexion par le coefficient :

$$\delta r = -\frac{1}{2n \sin^2 \theta} \frac{dn}{dx} \delta x \quad (29)$$

### 3.1.4 Diffraction de Bragg

8. Calculer  $\frac{dn}{dx}$  dans le cas où le milieu est traversé par l'onde sonore décrite en début de section.

Dans le cas étudié ici, l'indice est partout très peu différent de sa valeur moyenne, on pourra donc considérer avec une très bonne approximation que la lumière s'y propage en ligne droite.

9. En prenant comme référence de phase l'onde réfléchie par le plan de cote  $x = 0$ , calculer la phase de l'onde réfléchie par le plan de cote  $x$ .
10. Écrire l'amplitude complexe de l'onde réfléchie par le plan de cote  $x$ .
11. En déduire que l'onde sonore réfléchit l'onde lumineuse avec un coefficient de réflexion en amplitude donné par :

$$r = iql \frac{n_1}{4n_0 \sin^2 \theta} \left[ e^{i\phi} \operatorname{sinc}((q + 2k \sin \theta)l/2) - e^{-i\phi} \operatorname{sinc}((q - 2k \sin \theta)l/2) \right] \quad (30)$$

(où  $\operatorname{sinc}(x)$  est la fonction  $\sin x/x$  et où  $\phi = \Omega t + \varphi$ ).

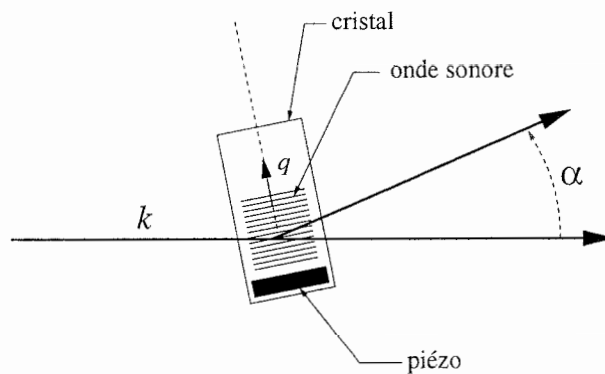


FIG. 6 : Principe d'un modulateur acousto-optique : une onde ultrasonore intense produite dans un cristal permet de prélever par diffraction Brillouin une partie d'un faisceau laser.

12. En déduire que lorsque l'on fait varier l'incidence de l'onde lumineuse, une onde réfléchie intense n'apparaît que lorsque l'angle dont elle est déviée (cf. fig.6) vaut  $\pm \alpha_B$  où  $\alpha_B$  est l'angle de Bragg donné par :

$$\sin \frac{\alpha_B}{2} = \frac{\lambda}{2\Lambda} \quad (31)$$

Cet effet qui se produit spontanément dans un milieu apparemment homogène comme l'a suggéré Léon Brillouin (d'où le nom de *diffusion Brillouin* qu'on lui donne) est utilisé dans un dispositif appelé *modulateur acousto-optique*. Il s'agit d'un cristal parcouru par une onde sonore intense de haute fréquence produite artificiellement par un transducteur piézoélectrique et qui peut prélever une fraction notable d'un faisceau laser grâce au phénomène de diffraction étudié ici.

### 3.2 Photons et phonons

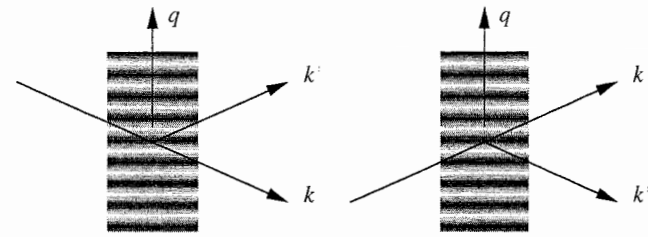
13. Rappeler la relation de Planck liant l'énergie et la fréquence dans un couple onde-particule.
14. Rappeler de même la relation de de Broglie liant l'impulsion au vecteur d'onde.

De même que le photon est la particule quantique associée à l'onde lumineuse, on peut définir une pseudo-particule associée à l'onde sonore, qu'on appelle un *phonon*.

15. Écrire les relations de Planck et de Broglie pour un phonon de vecteur d'onde  $\mathbf{q}$  et de pulsation  $\Omega$ .
16. Montrer en considérant la conservation de l'énergie et de l'impulsion que le processus de diffusion Brillouin décrit par le schéma de la figure 7(a) peut être interprété comme l'interaction d'un photon de l'onde électromagnétique incidente par un phonon de l'onde sonore selon la réaction :



où  $\gamma$  et  $\gamma'$  représentent respectivement les photons incident et diffusé et  $\Gamma$  le phonon.



(a) Diffusion Brillouin directe (b) Diffusion Brillouin inverse

FIG. 7 : *Diffusion Brillouin : deux processus sont possibles, soit la diffusion Brillouin directe (dite aussi dans l'ordre 1) soit la diffusion inverse (dans l'ordre -1)*

17. Comment, en utilisant les mêmes idées, peut-on interpréter le processus de diffusion représenté par la figure 7(b) ?
18. Comment peut-on justifier qualitativement qu'un milieu, même parfaitement homogène, produit de la diffusion Brillouin ?

## 4 Principe du Lidar

Une application particulièrement importante des lidars est le “lidar vent”, utilisé en météorologie qui utilise la rétrodiffusion de la lumière d’un laser à erbium (longueur d’onde  $1.56 \mu\text{m}$ , non dangereuse pour l’œil) sur les aérosols présents dans l’atmosphère (cf figure 1).

1. Quelles informations peut-on espérer extraire de la mesure de l’intensité, du retard et de la fréquence de l’onde rétrodiffusée ?
2. Pour augmenter la fiabilité des prédictions météorologiques, on souhaite avoir une résolution de l’ordre d’un mètre sur la distance. Quelle doit être la résolution temporelle  $\Delta t$  du système de détection ?
3. En déduire la bande passante minimale  $\Delta f$  de l’électronique de détection.

L’onde recueillie par le système lidar après propagation à travers l’atmosphère et rétrodiffusion par un aérosol est évidemment de très faible intensité et sa détection n’est pas facile. Dans les questions qui suivent nous allons passer en revue deux méthodes de détection, la détection directe et la détection hétérodyne.

### 4.1 Détection directe d’un signal lumineux

#### 4.1.1 Caractéristique d’une photodiode

4. On oppose généralement les *détecteurs quantiques*, parmi lesquels on range les photodiodes, les photomultiplicateurs, les pavés CCD des appareils photos numériques, etc. aux détecteurs non quantiques tels que les bolomètres, les détecteurs pyroélectriques, etc. Justifier qualitativement cette dénomination.
5. L’œil est-il un détecteur quantique ?
6. Rappeler succinctement les caractéristiques de l’effet photoélectrique.
7. En quoi ces caractéristiques sont-elles incompatibles avec une interprétation classique ?

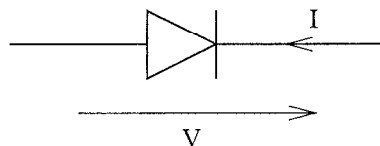


FIG. 8 : Représentation conventionnelle d’une photodiode, définissant les sens positifs de la tension et du courant.

On admet que la caractéristique courant-tension d’une photodiode est donnée, avec les conventions de signe de la figure 8, par l’expression :

$$I = I_0 \left( e^{-\frac{\beta q_e V}{kT}} - 1 \right) + \alpha \phi \quad (33)$$

où est  $V$  est la tension qui lui est appliquée,  $I$  l’intensité du courant qui la traverse et  $\phi$  le flux lumineux qu’elle reçoit dans sa bande de sensibilité. Dans cette expression,  $\alpha$  est appelée la *responsivité* de la photodiode, et  $\beta$  est un coefficient sans dimension, de l’ordre de 2.

8. Quand  $\phi$  est nul (noir complet), comment peut-on interpréter  $I_0$  ?
9. Pour utiliser la photodiode, doit-on choisir une tension positive ou négative ?

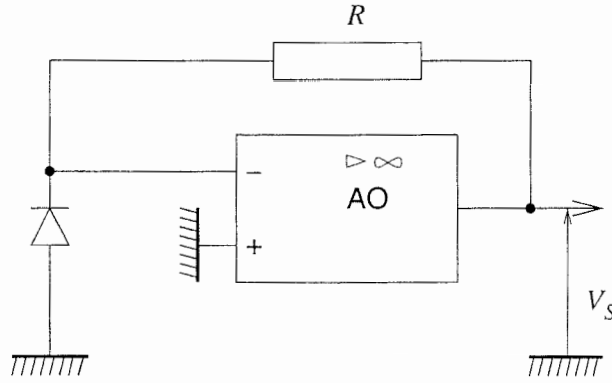


FIG. 9: Montage transimpédance à amplificateur opérationnel.

#### 4.1.2 Montage transimpédance

On réalise le montage dit *transimpédance* représenté figure 9 avec un amplificateur opérationnel supposé pour l'instant idéal et parfait.  $R$  est une résistance purement ohmique.

10. Calculer la tension de sortie de ce montage en fonction de  $\phi$ .
11. Quel est le flux maximum pour lequel ce montage est utilisable ?
12. Quel paramètre doit-on modifier si le flux à détecter est plus grand ?
13. Quelle caractéristique d'un amplificateur opérationnel réel empêche en pratique de détecter des flux arbitrairement grands ?

#### 4.1.3 Bruits de détection

Le problème dans le cas d'un lidar est plutôt la détection de tout petits flux lumineux, et celle-ci est empêchée par les différents *bruits* qui entache cette détection.

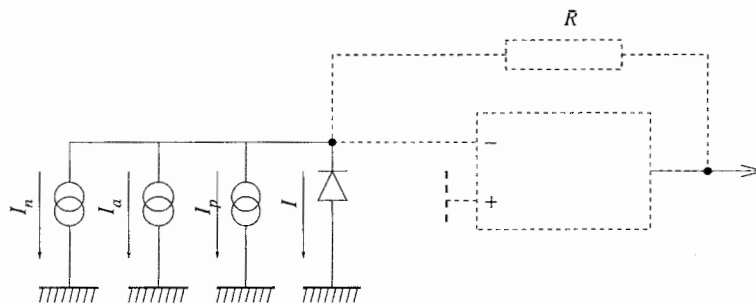


FIG. 10: Représentation des sources de bruit liés à la détection d'un signal.

Les principales sources de bruits qu'on rencontre dans un système électronique moderne sont : le *bruit quantique de détection* appelé *bruit de photons* dû à la nature corpusculaire de la lumière, divers bruits d'amplification dus aux constituants électroniques eux-même et le bruit de numérisation, associé à la conversion analogique-numérique. Ces bruits seront représentés par des sources de courant placées en parallèle sur la photodiode (figure 10).



Le bruit de numérisation dépend de manière particulière de l'amplitude du signal détecté. Le convertisseur sera supposé convertir sur  $N$  bits, c'est à dire que le résultat de la conversion sera un nombre entier compris entre  $-2^{N-1} + 1$  et  $2^{N-1}$ . Plus précisément le nombre obtenu  $n(V)$  où  $V$  est la tension à convertir est :

$$n(V) = P\left[\frac{V}{V_{max}} * 2^{N-1}\right] \quad (34)$$

où  $P[\ ]$  est la fonction partie entière et  $V_{max}$  la valeur de pleine échelle.

14. Quelle est la résolution du convertisseur ? On rappelle que la résolution, que l'on notera ici LSB de l'anglais "least significant bit" (bit le moins signifiant), est *la plus petite variation du signal certainement détectable*.
15. Que vaut l'erreur de numérisation ? (on pourra tracer un graphe schématique de cette erreur en fonction du signal).
16. Montrer que si le signal est affecté d'un bruit nettement inférieur au LSB, l'erreur de numérisation est strictement corrélée au bruit.
17. Justifier qu'au contraire si le bruit qui affecte le signal est nettement supérieur au LSB, l'erreur de numérisation et le bruit sont décorrélés (en pratique un bruit de 2 à 3 LSB suffit).
18. Calculer dans ce cas la variance de l'erreur de numérisation, et montrer que la contribution de la numérisation au bruit est alors à peu près négligeable.
19. Montrer qu'alors un moyennage suffisamment long permet de déterminer la valeur moyenne avec une précision meilleure que le LSB.
20. Cela reste-t-il vrai dans le cas précédent où le bruit était inférieur au LSB ? Commenter ce résultat.

Nous admettrons que le bruit de photons peut être représenté par une source de courant d'intensité  $I_p$ , de moyenne nulle et de variance :

$$\langle I_p^2 \rangle = i_p^2 = 2 I q_e \Delta f \quad (35)$$

où  $I$  est le courant de la photodiode,  $q_e$  la charge élémentaire, et  $\Delta f$  la bande passante du système de détection. Le bruit d'amplification sera représenté par une source de courant d'intensité  $I_a$  de moyenne nulle et de variance constante, égale à  $i_a^2$ .

21. Expliquer succinctement pourquoi les contributions des différentes sources de bruit s'ajoutent *quadratiquement*.
22. Un signal est détectable si on peut faire la différence entre la tension en sortie de chaîne avec et sans signal. Quelle est la plus petite valeur du signal détectable ?

## 4.2 Détection hétérodyne

Le principe de la détection hétérodyne, qui date des débuts de la radio, est de *mélanger* le signal à détecter d'amplitude très faible avec un signal d'amplitude constante beaucoup plus grande, et de recueillir le *signal de battement entre les deux*.

### 4.2.1 Signal hétérodyne

Pour ce faire on réalise le montage de la figure 11 : grâce à une lame séparatrice de faible réflectivité, on prélève une partie du faisceau laser du lidar dont on décale la fréquence avec le dispositif acousto-optique étudié dans la partie 3.1.4 d'une valeur  $\Omega$ . On appelle en général ce

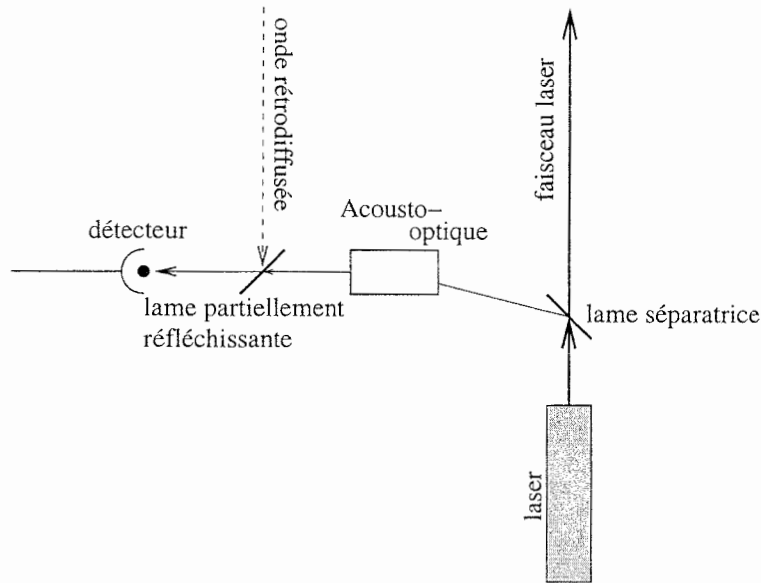


FIG. 11 : Principe de la détection hétérodyne : on mélange sur le détecteur l'oscillateur local issu du laser, décalé en fréquence par un modulateur acousto-optique, et le faisceau signal.

faisceau auxiliaire "l'oscillateur local". Grâce à une deuxième lame partiellement réfléchissante, on superpose sur la photodiode l'oscillateur local avec le faisceau rétrodiffusé. On notera  $S(t) = A e^{i(\omega+\Omega)t}$  l'amplitude de l'oscillateur local sur la photodiode et  $s(t) = a e^{i(\omega t+\phi)}$  celle du signal de rétrodiffusion. On rappelle que le flux lumineux est proportionnel à la valeur moyenne sur quelques périodes de l'onde de l'amplitude de l'onde électromagnétique.

23. Calculer la tension de sortie de l'amplificateur.

24. Montrer que dans cette tension de sortie apparaît un terme variable dans le temps de fréquence  $\Omega$ , appelé "signal hétérodyne".

Il est évidemment facile de faire en sorte que l'intensité lumineuse de l'oscillateur local soit bien plus grande que celle du signal direct.

25. Dans ce cas que vaut le bruit total ?

26. Montrer que si l'oscillateur local est d'intensité suffisante, le signal hétérodyne peut être plus grand que le bruit d'amplification, et donc détectable même dans le cas où il ne l'aurait pas été par détection directe.

27. Montrer qu'à la limite où l'intensité de l'oscillateur local est très grande, le rapport signal hétérodyne sur bruit devient égal au rapport signal sur bruit obtenu dans le cas d'une détection directe idéale (c'est à dire où seul interviendrait le bruit de photon).

28. Quelle information absente dans le cas de la détection directe, la détection hétérodyne permet-elle d'obtenir ?

# Annexe 1

18

LE BO  
N° 6  
12 AOÛT  
1999  
HORS-SÉRIE

PROGRAMMES  
DES LYCÉES

souhaitable que plusieurs domaines de la physique soient illustrés dans le choix des travaux pratiques. L'enseignant "pique" dans l'échelle des longueurs en plusieurs endroits afin d'illustrer la détermination expérimentale d'une longueur d'un ordre de grandeur déterminé. Le défi proposé peut être formulé ainsi :

- comment peut-on arriver à l'ordre de grandeur de la taille d'une molécule ?
- comment peut-on mesurer des longueurs dont l'ordre de grandeur est l'épaisseur d'un cheveu ?
- comment évaluer la distance de l'endroit où l'on se trouve au bâtiment d'en face ?
- comment peut-on mesurer des longueurs dont l'ordre de grandeur est le rayon de la Terre ?

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
Comment déterminer l'ordre de grandeur de la taille d'une molécule ? <i>Expérience de Franklin</i>	1.1. Présentation de l'Univers L'atome, la Terre, le système solaire, la Galaxie, les autres galaxies .	Utiliser à bon escient les noms des objets remplissant l'espace aussi bien au niveau microscopique (noyau, atome, molécule, cellule etc...) qu'au niveau cosmique (Terre, Lune, planète, étoile, galaxie). Savoir classer ces objets en fonction de leur taille. Savoir positionner ces objets les uns par rapport aux autres sur une échelle de distances. Savoir que le remplissage de l'espace par la matière est essentiellement lacunaire, aussi bien au niveau de l'atome qu'à l'échelle cosmique.
Comment déterminer l'ordre de grandeur de l'épaisseur d'un cheveu ? <i>Utilisation de la diffraction pour construire une courbe d'étalonnage et utilisation de cette courbe</i> <i>Utilisation d'un microscope ou d'une loupe</i>	1.2. Echelle des longueurs Echelle des distances dans l'univers de l'atome aux galaxies. Unités de longueur. Taille comparée des différents systèmes.	Connaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide (ou dans l'air) et savoir qu'il s'agit d'une vitesse limite. Convertir en année de lumière une distance exprimée en mètres et réciproquement. Expliquer que "voir loin, c'est voir dans le passé".
Comment évaluer la distance et les dimensions d'un immeuble ? <i>Méthode de la parallaxe</i> <i>Technique de la visée</i> <i>Utilisation du diamètre apparent</i>	1.3. L'année de lumière. Propagation rectiligne de la lumière. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air. Définition et intérêt de l'année de lumière.	Utiliser les puissances de 10 dans l'évaluation des ordres de grandeur, dans les calculs, et dans l'expression des données et des résultats. Repérer un angle
Comment déterminer la profondeur d'un fond marin ? <i>Technique du sonar</i>		<i>Mesurer une petite et une grande distance :</i> - mettre en œuvre une technique de mesure utilisée en TP - garder un nombre de chiffres significatifs en adéquation avec la précision de la mesure - exprimer le résultat avec une unité adaptée
Comment mesurer le rayon de la Terre ? <i>Méthode d'Eratosthène*</i> .		Compétence en cours d'acquisition : être capable d'effectuer une recherche documentaire et critique sur un cédérom ou sur internet.
Comment mesurer la distance de la Terre à la Lune ? <i>Technique de l'écho laser</i>		
Étude de documents textuels ou multimédias* donnant des informations sur les représentations du système solaire et sur les échelles de distances.		

\* Les activités pouvant mettre en jeu les technologies de l'information et de la communication sont repérées par un astérisque.

## Commentaires

Le travail sur cette grandeur fondamentale de la physique, la longueur, doit permettre à l'élève de faire une transition relativement aisée du collège au lycée. En effet, peu de notions nouvelles sont introduites. Ceci permet de travailler davantage en début d'année sur la méthodologie. Ainsi, l'accent est mis sur diverses compétences liées à la *langue française*, à l'*outil mathématique* et à l'*expérimentation*. Le travail autour de l'expérience de cours ou de travaux pratiques est essentiel afin que l'élève, comme il l'a fait au collège, continue d'apprendre à observer, à décrire, à schématiser, à analyser, à rédiger, à utiliser un vocabulaire scientifique, à argumenter...

Les compétences développées ici sont bien évidemment mises en jeu tout au long de l'année, mais c'est au cours de cette partie du programme que l'enseignant pourra cerner les difficultés de ses élèves et introduire, dès le début de l'année, quelques outils méthodologiques dans sa classe.

Il faut souligner que les activités expérimentales proposées pour la détermination des longueurs dans cette première partie font référence à des démarches historiques (Eratosthène, Franklin) ou à des techniques utilisées actuellement. Dans le cas de l'expérience d'Eratosthène, on remarque que la détermination du rayon de la Terre repose sur l'hypothèse de sa sphéricité qui, 250 ans avant notre ère, n'allait pas de soi et demandait à être justifiée.

L'utilisation de la diffraction ne doit pas conduire à un développement théorique. On constate qu'un obstacle de faible dimension provoque la diffraction de la lumière et on utilise ce phénomène pour déterminer des petites longueurs.

Il est bon d'avoir à l'esprit qu'à toutes les échelles, le remplissage de l'espace par la matière est lacunaire et discontinu.

Pour une meilleure compréhension des dimensions relatives du noyau et du nuage électronique de l'atome, on peut donner dans le cadre du cours de physique ou de chimie un exemple transposé à l'échelle humaine (si le cortège électronique avait la taille du Stade de France, le noyau de l'atome aurait approximativement la taille d'une tête d'épingle placée au centre). Le rapport entre la taille du Soleil et la taille du système solaire est du même ordre de grandeur.

**B - MAGNÉTISME. FORCES ÉLECTROMAGNÉTIQUES**
**Objectifs**

À cause de l'importance de l'attraction électrique entre charges de types opposés, la matière est presque toujours macroscopiquement neutre et les forces électrostatiques alors inobservables. Aussi ce sont les forces "magnétiques" qui ont au niveau macroscopique le rôle technique et industriel le plus important. De plus ces forces entraînent des effets mécaniques immédiatement observables, sans précautions particulières, permettant des manipulations aisées.

Enfin, on dispose là d'une interaction à distance, bien visible et contrôlable; c'est une situation de choix pour introduire pour la première fois un concept nouveau et fondamental, celui de champ, grandeur qui caractérise localement l'espace où se produisent les effets étudiés, mécaniques dans le cas présent.

EXERCICES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Étude documentaire sur l'histoire du magnétisme et de l'électromagnétisme*. <i>Expérience de l'aimant brisé.</i></p> <p>Comparaison de deux champs magnétiques.</p> <p>Mise en œuvre d'expériences montrant les caractéristiques du champ magnétique créée par: - un courant rectiligne ; - une bobine ou un solénoïde.</p> <p>Comparaison du champ externe d'un solénoïde et celui d'un barreau aimanté.</p> <p>Mise en évidence du champ magnétique terrestre .</p> <p>Utiliser la loi de Laplace pour interpréter qualitativement des expériences telles que: - barre mobile sur rails, - action entre courants parallèles, - mouvement d'une bobine au voisinage d'un aimant.</p> <p>Mise en évidence du principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique , d'un moteur à courant continu . Observer le fonctionnement en microphore d'un HP électro-dynamique.</p>	<p><b>1 - Champ magnétique</b> Action d'un aimant, d'un courant continu, sur une très courte aiguille aimantée. Vecteur champ magnétique <math>B</math> : direction, sens, valeur et unité. Exemples de lignes de champ magnétique; champ magnétique uniforme. Superposition de deux champs magnétiques (addition vectorielle)</p> <p><b>2 - Champ magnétique créé par un courant</b> Proportionnalité de la valeur du champ <math>B</math> et de l'intensité du courant en l'absence de milieux magnétiques. Champ magnétique créé par: - un courant rectiligne ; - un solénoïde .</p> <p><b>3 - Forces électromagnétiques</b> Loi de Laplace; direction, sens, valeur de la force : <math>F = IBS \sin \alpha</math></p> <p><b>4 - Couplage électromécanique</b> Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. Rôle moteur des forces de Laplace. Observation de l'effet réciproque associé au mouvement d'un circuit dans un champ magnétique : conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.</p>	<p>Une petite aiguille aimantée permet d'obtenir la direction et le sens du champ magnétique dans une petite région de l'espace. Les caractéristiques du vecteur champ magnétique. <i>Réaliser des spectres magnétiques.</i> <i>Utiliser une sonde à effet Hall.</i> Les lignes de champ magnétique se referment sur elles-mêmes. Connaître la topographie du champ magnétique créé par: - un courant rectiligne ; - un solénoïde.</p> <p>Savoir que la valeur de <math>B</math> dépend de la géométrie du courant, de son intensité ainsi que du point de mesure.</p> <p>Appliquer la loi de Laplace pour évaluer la force qui s'exerce sur une portion rectiligne de circuit.</p> <p>Sur un schéma de principe donné, représenter la force de Laplace qui explicite le fonctionnement : - d'un haut-parleur électrodynamique ; - d'un moteur à courant continu.</p> <p>Connaître les ordres de grandeur de la puissance des moteurs électriques usuels.</p>

\* Activités pouvant donner lieu à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication

**Commentaires**
**Champ magnétique**

Toute étude des actions mécaniques s'exerçant entre des aimants, ainsi que leur interprétation, sont exclues; l'action sur une petite aiguille aimantée est constatée et sert simplement de support expérimental pour introduire la notion de champ magnétique. L'unité est donnée et la valeur d'un champ magnétique est mesurée par une sonde spécifique (teslamètre).

L'expression du champ magnétique créé par un courant rectiligne n'est pas au programme; celle du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde de grande longueur, si elle est donnée, le sera sous la forme:  $B = \mu_0 nI$  avec  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} S.I.$

Remarque. On appelle "champ" toute grandeur, fonction des coordonnées de position d'un point de l'espace, utilisée pour décrire localement les propriétés de la matière ou pour interpréter les phénomènes qui s'y produisent; on parle ainsi de "champ de pression" (exemple des cartes météo); de même la distribution spatiale de température est un "champ de température" même si l'expression est peu utilisée; ce sont deux exemples de champs scalaires. Si la grandeur est vectorielle, on parle de "champ vectoriel", exemples: champ électrique, champ magnétique, champ de vitesses dans un fluide.

# Annexe 3

78

B.O.  
N° 4  
30 AOÛT  
2001  
HORS-SÉRIE

PHYSIQUE-CHIMIE

Il est à noter que la notion de temps caractéristique ne s'identifie pas à la constante de temps qui sera introduite lors de la résolution des équations différentielles. Pour les phénomènes périodiques, le temps caractéristique est identifié à la période ou la pseudo-période. Certains phénomènes peuvent présenter plusieurs temps caractéristiques (oscillations amorties).

## A - Propagation d'une onde ; ondes progressives (2 TP - 9 HCE)

### Objectifs

Les ondes comme phénomène sont omniprésentes et familières, mais leur constitution comme phénomène *physique* pose des difficultés bien connues dues à leur nature pour ainsi dire insaisissable : "quelque chose" se déplace, qui contient de l'information et de l'énergie, mais ce n'est pas de la *matière*. Comment le caractériser ? Quelles grandeurs physiques lui associe-t-on ? Quels sont les comportements génériques des ondes ? Dans cette première approche du phénomène, le formalisme est réduit au minimum, l'accent étant mis sur la phénoménologie. Le modèle ondulatoire de la lumière peut alors être mis en place à partir d'une similitude de comportement : la diffraction.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Exemples de propagation d'ondes mécaniques connues (vagues, ondes sonores, ondes sismiques etc.)*.</p> <p><i>Présentation qualitative d'ondes à une, deux et trois dimensions (corde, ressort, cuve à ondes, ondes sonores).</i></p> <p><i>Comparaison du déplacement d'un mobile et de celui d'une perturbation mécanique afin d'en montrer les différences fondamentales</i></p> <p><i>Illustration de l'influence de l'inertie et de la rigidité du milieu sur la célérité au moyen de dispositifs mécaniques simples (masses en mouvement plus ou moins grandes, ressorts plus ou moins rigides, cordes plus ou moins tendues, milieu plus ou moins compressible).</i></p> <p><i>Étude avec corde et ressort, cuve à ondes, son (clap) et ultrasons (salves) : mesure de retard, calcul de la célérité d'une onde, influence du milieu.</i></p>	<p><b>1 - Les ondes mécaniques progressives</b></p> <p>1.1 Introduction À partir des exemples donnés en activité dégager la définition suivante d'une onde mécanique : "on appelle onde mécanique le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu sans transport de matière". Célérité. Ondes longitudinales, transversales. Ondes sonores comme ondes longitudinales de compression-dilatation. Propriétés générales des ondes : - une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes - la perturbation se transmet de proche en proche ; transfert d'énergie sans transport de matière. - la vitesse de propagation d'une onde est une propriété du milieu. - deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.</p> <p>1.2 Onde progressive à une dimension Notion d'onde progressive à une dimension. Notion de retard : la perturbation au point M à l'instant <math>t</math> est celle qui existait auparavant en un point <math>M'</math> à l'instant <math>t' = t - \tau</math> : avec <math>\tau = M'M/v</math>, <math>\tau</math> étant le retard et <math>v</math> la célérité (pour les milieux non dispersifs).</p>	<p>Définir une onde mécanique et sa célérité. Définir et reconnaître une onde transversale et une onde longitudinale. Connaître et exploiter les propriétés générales des ondes. Définir une onde progressive à une dimension et savoir que la perturbation en un point du milieu, à l'instant <math>t</math>, est celle qu'avait la source au temps <math>t' = t - \tau</math>, <math>\tau</math> étant le retard (dans un milieu non dispersif). Exploiter la relation entre le retard, la distance et la célérité. Exploiter un document expérimental (chronophotographies, vidéo) donnant l'aspect de la perturbation à des dates données en fonction de l'abscisse : interprétation, mesure d'une distance, calcul d'un retard et/ou d'une célérité. Exploiter un document expérimental (oscillogrammes, acquisition de données avec un ordinateur... ) obtenu à partir de capteurs délivrant un signal lié à la perturbation et donnant l'évolution temporelle de la perturbation en un point donné : interprétation, mesure d'un retard, calcul d'une célérité, calcul d'une distance.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Utiliser un dispositif expérimental pour mesurer un retard ou une distance lors de la propagation d'une onde. En particulier utiliser un oscilloscope pour mesurer le retard d'un clap sonore ou d'une salve d'ultrasons.</i></p>
<p>Exemples dans la vie courante d'ondes mécaniques progressives périodiques.</p> <p>Exemples pris dans notre environnement de la diffraction d'ondes mécaniques.</p> <p><i>Dans le cas d'une onde ultrasonore, ou sur la cuve à ondes, observation des maximums et minimums d'amplitude pour la diffraction.</i></p>	<p><b>2 - Ondes progressives mécaniques périodiques</b></p> <p>Notion d'onde progressive périodique. Périodicité temporelle, période ; périodicité spatiale. Onde progressive sinusoïdale, période, fréquence, longueur d'onde ; relation <math>\lambda = vT = v/v</math>. La diffraction dans le cas d'ondes progressives sinusoïdales : mise en évidence expérimentale. Influence de la dimension de l'ouverture ou de l'obstacle sur le phénomène observé. La dispersion : mise en évidence de l'influence de la fréquence sur la célérité de l'onde à la surface de l'eau : notion de milieu dispersif.</p>	<p>Reconnaître une onde progressive périodique et sa période. Définir pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence, la longueur d'onde. Connaître et utiliser la relation <math>\lambda = vT</math>, connaître la signification et l'unité de chaque terme, savoir justifier cette relation par une équation aux dimensions. Savoir, pour une longueur d'onde donnée, que le phénomène de diffraction est d'autant plus marqué que la dimension d'une ouverture ou d'un obstacle est plus petite. Définir un milieu dispersif. Exploiter un document expérimental (série de photos, oscillogramme, acquisition de données avec un ordinateur... ) ; détermination de la période, de la fréquence, de la longueur d'onde. Reconnaître sur un document un phénomène de diffraction.</p> <p>Savoir-faire expérimentaux <i>Réaliser un montage permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction dans le cas d'ondes mécaniques, sonores ou ultrasonores.</i></p>



## Annexe 4

Le	Cahier de Textes Physique TS	Pour le
7/09/2006	<p><b>CH1 Les ondes mécaniques progressives</b></p> <p>I- Définition</p> <p>II- Propriétés générales</p> <p>1- La propagation</p> <p>2- La perturbation</p> <p>3- Milieux de propagation</p> <p>III- Cas particulier de l'onde progressive à une dimension : notion de retard</p> <p>Ex 13 p 36 en classe</p> <p><i>Terminer ex 13 puis 17, 19, 20 p36</i></p>	14 /09/2006
14 /09/2006	<p><i>Correction ex 13, 17 p36</i></p> <p><b>CH2 Ondes mécaniques progressives périodiques.</b></p> <p>I- Définition</p> <p>II- Onde progressive sinusoïdale</p> <p>1- Définition</p> <p>2- Mouvement d'un point de la corde :périodicité temporelle</p> <p>3- Périodicité spatiale : longueur d'onde</p> <p>4- Relation entre T et <math>\lambda</math></p> <p><i>Ex 8, 13, p 56</i></p>	21 /09/2006
19 /09/2006	<b>TP</b>	
21/09/2006	<p><i>Correction 19 p36, 13, 8, p56</i></p> <p><b>CH2 Ondes mécaniques progressives périodiques.(fin)</b></p> <p>III- Diffraction et dispersion des ondes progressives sinusoïdales</p> <p>1- Ondes progressives périodiques à la surface de l'eau</p> <p>2- Le phénomène de dispersion</p> <p>3- Diffraction</p> <p>IV- Ondes progressives non sinusoïdales</p> <p>Ex en classe14, p 57</p> <p><i>Ex 22 p 57</i></p>	28/09/2006
28/09/2006	<b>DS1- 2h</b>	
3/10/2006	<b>TP</b>	
5/10/2006	<p><i>Correction DS1</i></p> <p>Election des délégués de classe ¼ h.</p> <p><b>CH3 Modèle ondulatoire de la lumière</b></p> <p>I. Propagation de la lumière dans le vide</p> <p>1- Expériences</p> <p>2- Modèle ondulatoire de la lumière</p> <p>3- Etude de la diffraction</p> <p>II. Propagation de la lumière dans un milieu transparent</p> <p>1- Indice de réfraction</p> <p>2- Dispersion de la lumière blanche</p> <p><i>Retravailler le devoir avec le corrigé</i></p> <p><i>Ex 15, 17, 23, 24, p 76</i></p>	12/10/2006