Physique

Les ondes

Ir Jacques COLLOT

6G - 3 périodes par semaine

Athénée royal du Condroz "Jules Delot"
Janvier 2011

LES ONDES

ERRATA

1) Page 23, ligne 8 : remplacer la solution par
$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \times 0.2 \times (3\pi)^2 \times 0.5^2 = 9.13\,\text{J}$
2) Page 26, avant dernière ligne : remplacer $\theta = \frac{y}{L}\theta$ par $\theta = \frac{y}{L}$
3) Page 47. Point 22 : $k = 10$ N/m
4) Page 51. Point 42. N°4. Réponse : $y = 6\sin(4\pi t + 5\pi/4)$
5) Page 51. Point 43. N°1. $y = 7\sin(0.28t + 2\pi/5)$
6) Page 51. Point 43. N°2 : $y_2 = 7\sin(4t + \pi/3)$ et $y = 10.65\sin(4t + 1.24)$
7) Page 53. Point 3.1. Supprimer le dernier paragraphe commençant par 'Si nous le désirons….
8) Page 69. Fin de la ligne 8 en partant du bas : 140 **m**/s^2 au lieu de 140 /s^2.
9) Page 72. Point 10 (b). Mettre d en italique.
10) Page 72. Point 12. Deuxième ligne : Ce**s** vibrations….
11) Page 75. Point 26. Dernière ligne. Ajouter une) à la fin.
12) Page 78. Conclusions.
    a. Au point 1. Un mi**l**ieu….
    b. Au point 2. Remplacer « l'élasticité » par « **la rigidité** »
13) Page 83. Ligne 8 avant la fin. Remplacer « 10^{-4} atm ou 10^4 Pa » par « 10^{-4} atm ou **10** Pa »
14) Page 96. Transférer l'exercice 11 au point 7.10 page 152 dans les exercices sur les ondes stationnaires. VERIFIER EXERCICE
15) Page 96. Transférer l'exercice 24 au point 7.10 page 152 dans les exercices sur les ondes stationnaires
16) Page 126. Point 6.5. Exercice 6. Remplacer *A,B,C,D* et *D* par *A,B,C* et *D*
17) Page 138. Note de bas de page. Formule de Simpson. Ecrire
$\sin p + \sin q = 2\sin\frac{p+q}{2}\cos\frac{p+q}{2}$
18) Page 160. Point 35. Supprimer l'exercice.
19) Page 178. Exercice 17
    a. Quelle fréquence perçoit **un observateur** lorsqu'il s'approche de …
    b. Changer les réponses : 862 Hz, 867 Hz, 742 Hz
20) Page 197. Exemple dans le fond de la page. Une figure d'interférence apparaît sur un écran situé à 1 m. **Supprimer le reste de la phrase.**
21) Page 198. 6ème ligne : $d_2 - d_1 = a\tan\theta$
22) Page 210. Deuxième ligne en-dessous de « Etude mathématique ». La distance **entre** la source….
23) Page 211. Le paragraphe commençant a) est le paragraphe **b)**
24) Page 216. Ajouter une note de fin de page. « *a* est la distance entre 2 fentes. Ne pas confondre avec le *a* de la formule (9.5) qui est la largeur d'une fente. »
25) Page 219. Après 9.11 Exercices. Ajouter : **a) Expérience de Young**.
26) Page 220.
    a. Ajouter après l'exercice 8. **b) Diffraction.**

b. Transférer l’exercice 7 dans les exercices de diffraction

27) Page 221. Transférer l’exercice 17 dans les expériences de Young

Table des matières

1 Savoirs, savoir-faire et compétences **9**
- 1.1 Prérequis . . . 9
- 1.2 Exemples de questionnement . . . 9
- 1.3 Savoirs . . . 9
- 1.4 Compétences . . . 10

I Les ondes mécaniques **13**

2 L'oscillateur harmonique **15**
- 2.1 Mouvement périodique . . . 15
- 2.2 Mouvement harmonique . . . 16
  - 2.2.1 Représentation graphique . . . 16
  - 2.2.2 Dynamique du MVS . . . 19
  - 2.2.3 Energie d'un oscillateur . . . 22
  - 2.2.4 Mouvement vibratoire amorti . . . 23
  - 2.2.5 Exemples de MVS . . . 23
  - 2.2.6 Les applications du pendule . . . 27
- 2.3 Composition de deux MVS . . . 29
  - 2.3.1 Le vecteur de Fresnel . . . 29
  - 2.3.2 Déphasage entre deux MVS . . . 30
  - 2.3.3 Composition de deux MVS de même fréquence . . . 32
- 2.4 Exercices . . . 38
  - 2.4.1 Exercices résolus . . . 38
  - 2.4.2 Exercices non résolus . . . 42

3 La résonance **53**
- 3.1 Le pendule simple . . . 53
- 3.2 Définitions . . . 53
- 3.3 Expérience . . . 54
- 3.4 Conclusions . . . 55
- 3.5 Applications . . . 55

4 Généralités sur les ondes **59**
- 4.1 Introduction . . . 59
- 4.2 Définition d'une onde . . . 59

4.3 Classification des ondes . . . 60
4.3.1 La direction . . . 60
4.3.2 Le milieu de propagation . . . 61
4.3.3 La nature du mouvement . . . 61
4.4 Vitesse d'une onde . . . 62
4.5 Longueur d'onde . . . 63
4.6 Double périodicité . . . 64
4.6.1 Périodicité dans le temps . . . 64
4.6.2 Périodicité dans l'espace . . . 65
4.7 Equation de propagation . . . 65
4.7.1 Introduction . . . 65
4.7.2 Les ondes sinusoïdales progressives . . . 67
4.8 Complément pour information - L'équation d'onde . . . 70
4.9 Exercices . . . 71

5 Acoustique **77**
5.1 L'acoustique . . . 77
5.2 Les ondes acoustiques . . . 77
5.2.1 Production des ondes sonores . . . 77
5.2.2 Conclusions . . . 80
5.3 Son et bruit . . . 80
5.4 Vitesse du son . . . 81
5.5 Caractéristiques d'un son . . . 82
5.5.1 Intensité . . . 82
5.5.2 Hauteur . . . 86
5.5.3 Timbre . . . 87
5.6 L'oreille . . . 89
5.6.1 Anatomie de l'oreille . . . 89
5.6.2 Les dangers des bruits intenses . . . 89
5.7 Lecture : Les dangers du baladeur . . . 90
5.7.1 Devenir sourd adolescent ? . . . 90
5.7.2 Pourquoi écoute-t-on aussi fort son baladeur mp3 ? . . . 91
5.7.3 La différence entre les musiques . . . 92
5.7.4 Le risque pour l'ouïe . . . 93
5.8 La musique . . . 93
5.8.1 Fréquence . . . 93
5.9 Exercices . . . 94

6 Propagation des ondes **99**
6.1 Propagation sans obstacles . . . 99
6.1.1 Propagation sans obstacle . . . 99
6.2 Réflexion des ondes . . . 102
6.2.1 Expérience . . . 102
6.2.2 Démonstration de la loi de la réflexion . . . 103
6.2.3 Conclusions . . . 104
6.2.4 Applications . . . 104

6.3 Réfraction des ondes . . . 108
6.3.1 Expérience préliminaire . . . 108
6.3.2 Expérience de réfraction . . . 108
6.3.3 Démonstration de la loi de la réfraction . . . 109
6.3.4 Conclusions . . . 110
6.3.5 Applications . . . 111
6.4 La diffraction des ondes . . . 117
6.4.1 Expériences . . . 117
6.4.2 Explications théoriques . . . 120
6.4.3 Conclusions . . . 121
6.4.4 Applications . . . 121
6.4.5 Lecture : La chauve-souris . . . 124
6.5 Exercices . . . 126

7 Superposition d'ondes **131**
7.1 Introduction . . . 131
7.2 Principe de superposition . . . 131
7.3 Ondes stationnaires . . . 134
7.3.1 Réflexion d'une impulsion . . . 134
7.3.2 Ondes sinusoïdales . . . 134
7.4 Etude analytique . . . 138
7.4.1 Mode fondamental : $n = 1$ . . . 139
7.4.2 Harmonique : $n = 2$ . . . 139
7.4.3 Harmonique : $n = 3$ . . . 140
7.4.4 Conclusion . . . 141
7.5 Corde libre à une ou aux deux extrémités . . . 141
7.5.1 Conclusion . . . 142
7.6 Les régimes stationnaires dans l'air . . . 142
7.7 Applications . . . 143
7.7.1 Physique moderne . . . 143
7.7.2 Les instruments de musique . . . 144
7.8 Lecture : la voix . . . 145
7.9 Les interférences . . . 148
7.9.1 Expérience . . . 148
7.9.2 Etude analytique . . . 149
7.10 Exercices . . . 152

8 L'effet Doppler **165**
8.1 Définition . . . 165
8.2 Formule . . . 166
8.3 Application . . . 170
8.3.1 Détection des objets en mouvement . . . 170
8.3.2 Radar pour déterminer la vitesse d'une auto . . . 170
8.3.3 Cardiologie . . . 170
8.3.4 Astronomie . . . 171
8.3.5 Météorologie . . . 173

8.4 Lecture : Le mur du son . . . 174
8.5 Exercices . . . 176

II Les ondes électromagnétiques 181

9 La propagation de la lumière 183
9.1 La dispersion de la lumière par un prisme . . . 183
9.2 Identification d'une source lumineuse . . . 184
9.2.1 Le spectroscope . . . 184
9.2.2 Spectre . . . 184
9.3 Comportements connus de la lumière . . . 185
9.4 Lecture : les arcs-en-ciel . . . 188
9.5 Modèle corpusculaire et modèle ondulatoire . . . 191
9.6 Les interférences lumineuses . . . 193
9.6.1 Expérience de Young . . . 193
9.6.2 Etude analytique . . . 194
9.6.3 Conclusion . . . 198
9.6.4 Applications des interférences . . . 199
9.7 Lecture : les interférences en couches minces . . . 201
9.8 Lecture : Le CD . . . 202
9.9 Lecture : les hologrammes. . . . 204
9.10 La diffraction de la lumière . . . 207
9.10.1 Introduction . . . 207
9.10.2 Observations . . . 207
9.10.3 Diffraction par une fente . . . 210
9.10.4 Diffraction par un réseau . . . 216
9.11 Exercices . . . 219

10 Nature des ondes électromagnétiques 223
10.1 Expériences . . . 223
10.1.1 Emetteur - récepteur . . . 223
10.1.2 Antennes (émetteur-récepteur) . . . 224
10.2 Spéculation de Maxwell . . . 226
10.3 Le spectre électromagnétique . . . 227
10.4 Applications des ondes EM . . . 228
10.4.1 Les ondes hertziennes ou ondes radio . . . 228
10.4.2 Les ondes TV . . . 231
10.4.3 Les ondes radar . . . 231
10.4.4 Les micro-ondes . . . 231
10.4.5 L'infrarouge . . . 233
10.4.6 La lumière visible (rouge au violet) . . . 234
10.4.7 L'ultraviolet UV . . . 234
10.4.8 Les rayons X . . . 236
10.4.9 Les rayons γ (gamma) . . . 237

11 Annexes **241**

12 Bibliographie **247**

Chapitre 1

Savoirs, savoir-faire et compétences

1.1 Prérequis

- Lois de Newton.
- MCU.
- Energie.
- Self induction.
- Comportement d'un condensateur en alternatif.
- Réflexion, réfraction et dispersion de la lumière.

1.2 Exemples de questionnement

- Qu'est-ce qu'un amortisseur de voiture ?
- Qu'est que la résonance ?
- Est-il possible de casser un verre en chantant ?
- Un pont peut-il s'effondrer quand des soldats marchant au pas le traversent ?
- Qu'est ce qu'une onde ?
- Le GSM est-il dangereux ?
- Les ondes électromagnétiques sont-elles dangereuses ?
- Qu'est-ce qu'une gamme d'ondes ?
- Comment peut-on mesurer la vitesse de la lumière ?
- Qu'est-ce que l'effet Doppler ?
- Comment la police mesure-t-elle la vitesse des voitures avec leurs radars ?

1.3 Savoirs

Oscillations

- Période, fréquence, amplitude, pulsation, élongation et phase.
- Mouvement harmonique simple.
- Mouvement d'un corps suspendu à un ressort.
- Pendule simple.

- Energie d'un système oscillant.
- Amortissement.
- Oscillations forcées et résonance.
- Résonance du circuit LC : fréquence propre.
- Composition de deux mouvements harmoniques simples de même direction et de même fréquence.

Ondes matérielles

- Longueur d'onde.
- Vitesse de propagation.
- Propagation d'énergie.
- Equation de propagation (y = f(t,x)).
- Ondes transversales et longitudinales.
- Propriétés générales :
  - Transmission d'énergie.
  - Principe de Huygens.
  - Réflexion.
  - Réfraction.
  - Diffraction.
  - Dispersion.
  - Superposition de deux ondes :
  - Interférences
  - Régime stationnaire, résonance.
  - Effet Doppler.
- Applications en acoustique et en optique.
- Perception des sons par l'oreille humaine, définition du décibel.
- Ondes électromagnétiques, spectre électromagnétique.

1.4 Compétences

Oscillations

- Dans le cas d'un oscillateur harmonique, montrer que l'accélération est proportionnelle à l'élongation et établir la relation permettant de calculer l'énergie mécanique. Montrer qu'elle est constante.
- Etablir les relations qui permettent de calculer les périodes d'oscillation du ressort et du pendule simple.
- Associer la diminution d'amplitude d'une oscillation amortie à la diminution d'énergie mécanique.
- Associer des fréquences propres à un système oscillant.
- Donner la condition pour qu'un système soit en résonance et citer des exemples de la vie courante.
- Reconnaître, à partir de graphiques, un déphasage, une concordance et une opposition de phase.
- Composer deux mouvements harmoniques simples de même direction et de même fréquence.

Ondes

- Etablir la relation entre la fréquence de la vibration, la vitesse de propagation et la longueur d'onde.
- Décrire et interpréter les expériences réalisées pour mettre en évidence les propriétés des ondes.
- Etablir l'équation de l'onde progressive transversale : y = f(t,x).
- Utiliser et interpréter les graphiques $y = f(t)$ et $y = f(x)$.
- Exprimer, en fonction de la longueur d'onde, la distance entre les points qui vibrent en concordance de phase et en opposition de phase.
- Appliquer le principe de superposition pour expliquer les propriétés des interférences et du régime stationnaire.
- En se basant sur les observations faites à l'oscilloscope, lier les caractéristiques d'un son aux propriétés des vibrations.
- Mesurer, par une expérience, la vitesse du son dans l'air.
- Expliquer comment l'oreille perçoit les sons et quels sont les dangers causés par un niveau d'intensité sonore trop élevé.
- Montrer, en se basant sur des expériences, l'aspect ondulatoire de la lumière.
- Etablir la loi de la réfraction à partir de la théorie ondulatoire.
- Trouver, en se basant sur une expérience de diffraction, la longueur d'onde d'une source monochromatique.
- Distinguer les ondes matérielles des ondes électromagnétiques.
- Classer les ondes électromagnétiques suivant leur gamme de fréquence.
- Expliquer les principes physiques de base de quelques techniques médicales courantes (échographie, Doppler, etc).
- Expliquer quelques applications technologiques des phénomènes ondulatoires (télédétection, caméra infrarouge, four à micro-ondes, sonar, hologramme, lecteur CD, GPS,etc)

La vache
L'optimiste pense que l'Homme posera un jour le pied sur...
le Soleil.
A condition d'y aller la nuit.

Première partie

Les ondes mécaniques

Chapitre 2

L'oscillateur harmonique

2.1 Mouvement périodique

Nous connaissons des phénomènes de la vie courante qui se répètent régulièrement ; le mouvement de la Lune autour de la Terre, celui de la Terre autour du Soleil, celui d'une balançoire, celui d'un piston, l'oscillation d'un ressort et l'oscillation d'un pendule, le mouvement de l'aiguille de la montre,etc.

Un mouvement est dit périodique s'il se reproduit identique à lui-même au bout d'intervalles de temps égaux.

Parmi les mouvements périodiques, nous nous intéresserons aux objets effectuant des oscillations périodiques de part et d'autre d'une position d'équilibre. Exemples : masse suspendue à un ressort, pendule, diapason frappé, lame vibrante,corde de guitare, etc.

Les définitions suivantes sont importantes :

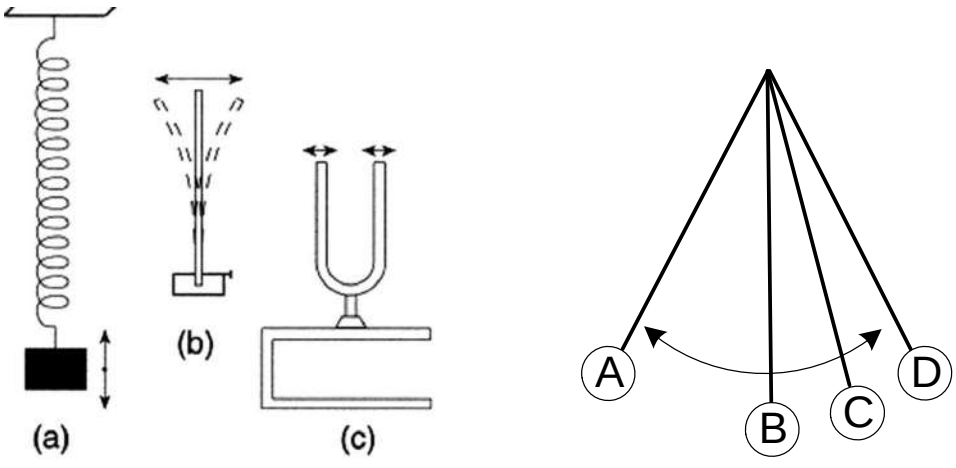


FIGURE 2.1 – Figure de gauche (a) un ressort, (b) une lame vibrante, (c) un diapason. Figure de droite : différentes positions d'un pendule (a) et (d) positions extrêmes qui déterminent l'amplitude (b) position d'équilibre (c) une position quelconque.

- **Oscillateur** : objet décrivant un mouvement de va et vient de part et d'autre d'une position d'équilibre 0.
- **Oscillation** : mouvement de l'oscillateur ;

- **L'élongation** y : distance qui sépare l'objet de sa position d'équilibre 0 ;
- **Amplitude** A : valeur maximale de l'élongation y ;
- **Période** T : durée d'une oscillation complète (temps pour aller d'un point et y revenir dans le même sens). La période T se mesure en secondes (s) ;
- **Fréquence** f : nombre d'oscillations effectuées en une seconde. Elle se mesure en hertz (Hz) (1hz = 1 vibration/s).

La fréquence f et la période T sont liées par la relation :

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.1}$$

2.2 Mouvement harmonique

Parmi les mouvements périodiques, il y en a un qui se prête particulièrement bien à une étude mathématique : c'est le *mouvement harmonique*[1] *simple ou sinusoïdal* (MVS[2]).

Regardons en détails, l'oscillation d'un pendule laissant *une trace sur son passage* qui n'est rien d'autre qu'une sinusoïde. (Voir figure 2.2).

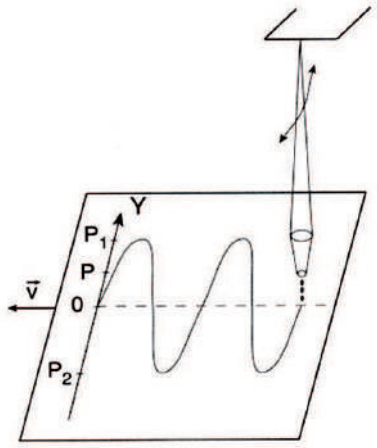


FIGURE 2.2 – Un entonnoir est rempli de sable. Il est suspendu au-dessus d'une plaque horizontale. L'entonnoir constitue un pendule. Quand le sable s'écoule du pendule il décrit une sinusoïde sur la plaque qui se déplace à vitesse constante

2.2.1 Représentation graphique

Eclairons latéralement un disque vertical en rotation uniforme autour de son centre et observons la projection de ce mouvement sur un écran.

La *projection sur un axe*, d'un mouvement circulaire uniforme est un mouvement harmonique.(Voir figure 2.3).

1. Nous verrons plus loin que l'adjectif *harmonique* est lié à l'acoustique et à la musique.
2. MVS : **M**ouvement **V**ibratoire **S**inusoïdale

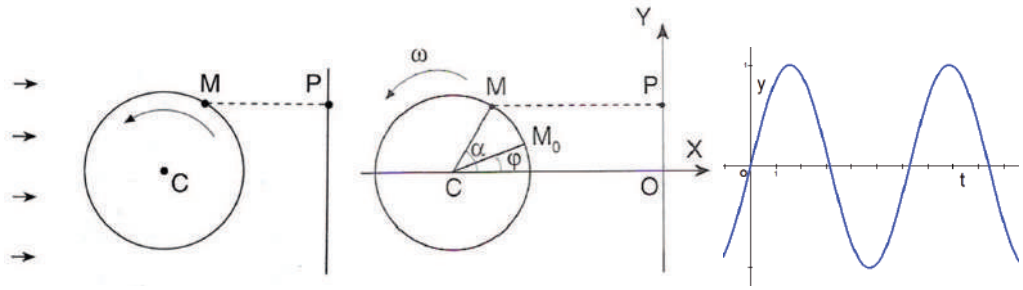


FIGURE 2.3 – Eclairons latéralement un disque vertical pouvant tourner autour de son centre C et comportant un objet M situé quelque part sur la périphérie. Soit P l'ombre de M projetée sur un écran vertical. Lorsque nous faisons tourner le disque à vitesse constante (MCU), l'ombre P décrit un mouvement d'oscillation qui est un mouvement harmonique, c'est-à-dire un mouvement sinusoïdal. M_0 et φ_0 sont la position du mobile et l'angle à l'instant $t = 0$; M et φ à l'instant t.

Equations du MVS

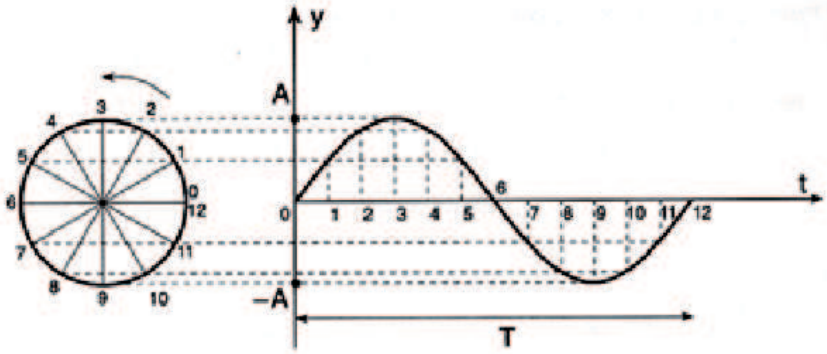


FIGURE 2.4 – Construction de la sinusoïde à partir du MCU. Si $\varphi = 0$ alors le graphe de $y = f(t)$ est tel que $y = 0$ en $t = 0$.

Soit un cercle de rayon R et de centre O sur lequel un point M est en MCU à la vitesse angulaire constante. Projetons le vecteur tournant $\overrightarrow{OM}$ sur l'axe Y vertical. Supposons qu'en $t = 0$, et l'axe X fasse un angle φ. A l'instant t, cet angle devient $\omega t + \varphi$. Avec $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ qui représente la vitesse angulaire de M. Considérons le mouvement du point P (projection de M sur Y). Nous avons $OP = \sin\varphi$. Le point P décrit autour de O, un mouvement rectiligne vibratoire ou harmonique. Le graphique $y = f(t)$ qui décrit le mouvement de P en fonction du temps t est une sinusoïde d'où le nom de mouvement vibratoire sinusoïdal donné à ce mouvement. (Voir figure 2.4).

L'élongation y du point P est donnée par la fonction :

$$y = A\sin(\omega t + \varphi) \tag{2.2}$$

y	L'élongation (m)	C'est la distance de O à P. Elle varie avec le temps t. La valeur maximale de l'élongation est l'amplitude (ici $= R$ mais souvent notée A). Elle est constante et toujours positive. $y = A$ quand $\sin(\omega t + \varphi) = 1$.
ω	Pulsation (rad/s). C'est la vitesse angulaire du MCU correspondant.	$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$
$\omega t + \varphi$	Phase du mouvement (rad)	Angle qui précise la position du point P
φ	Phase à l'origine ou constante de phase (rad)	Angle qui précise la position à l'instant initial $t = 0$

Lois de la vitesse et de l'accélération

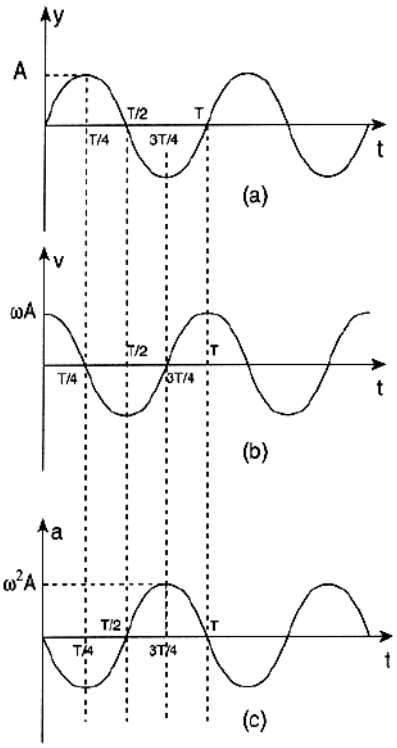


FIGURE 2.5 – Représentation graphique de l'élongation, de la vitesse et de l'accélération d'un oscillateur harmonique en fonction du temps. Notez que la vitesse est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur l'élongation et que l'accélération est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur la vitesse, donc en avance de π sur l'élongation.

Soit un mobile P se déplaçant sur un axe OY. Si y_1 désigne l'abscisse à l'instant t_1 et y_2 celle à l'instant t_2 ; alors il parcourt une distance $\Delta y = y_2 - y_1$ au cours de l'intervalle

de temps $\Delta t = t_2 - t_1$, et, sa **vitesse moyenne** au cours de cet intervalle se calcule par : $v_{moy} = \dfrac{\Delta y}{\Delta t}$. Pour déterminer la **vitesse instantanée** du mobile à l'instant t_1, il faut calculer la vitesse moyenne sur un intervalle de temps où t_2 est infiniment proche de t_1. Par définition, $v_{inst} = \lim\limits_{t\to 0} \dfrac{\Delta y}{\Delta t} = y'(t)$, c'est-à-dire la dérivée de $y(t)$ par rapport à t.
De même pour l'accélération : $a_{inst} = \lim\limits_{\Delta t\to 0} \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = v'(t) = y''(t)$
Elles sont donc obtenues par dérivation par rapport au temps de la fonction espace y (ou loi du mouvement) pour la vitesse et par dérivation de la loi de la vitesse pour l'accélération. (Voir figure 8.12).

$$\boxed{v(t) = y' = A\omega\cos(\omega t + \varphi)} \tag{2.3}$$

$$\boxed{a(t) = y'' = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi)} \tag{2.4}$$

2.2.2 Dynamique du MVS

Dans un MVS, l'accélération est toujours de signe contraire à l'élongation. Elle est donc toujours dirigée vers le centre.

Nous savons que l'accélération est due à une force ou un ensemble de forces dont la résultante est telle que $\vec{F} = m.\vec{a}$ et ce d'après la seconde loi de Newton.

Par conséquent, lorsqu'un mouvement est harmonique, la force qui le produit a pour grandeur : $F = -m\omega^2 y$ avec m , ω qui sont des constantes du mouvement, on écrira :

$$\boxed{F = -k.y} \tag{2.5}$$

Conclusion. La force produisant un mouvement harmonique sur un corps de masse m :

- est proportionnelle à l'élongation y ;
- est toujours de signe opposé à l'élongation : F est une force de rappel.

Réciproquement, si une force (agissant sur un corps de masse m) possède ces deux caractéristiques, alors le mouvement de cette masse doit être harmonique de pulsation ou de période :

$$\boxed{\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}} \qquad \boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}} \tag{2.6}$$

Remarque : Cette conclusion et sa réciproque sont très importantes.

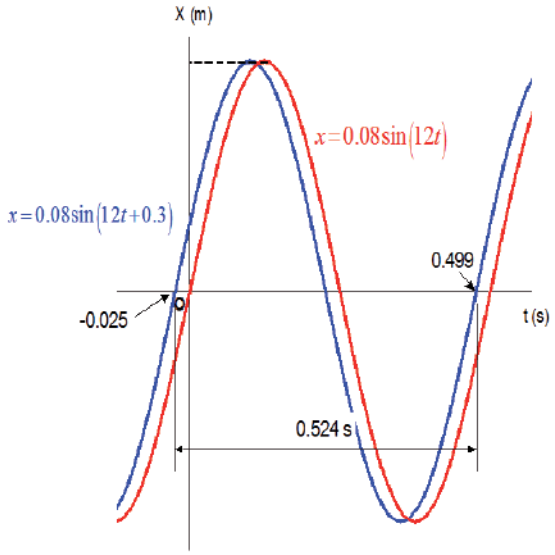


FIGURE 2.6 – Position d'une particule en mouvement en fonction du temps

Exemple La position d'une particule en mouvement sur l'axe des x est donnée par

$$x = 0.08\sin(12t + 0.3)$$

où x est en mètres et où t est en secondes.

1. Tracer la courbe $x(t)$ représentant cette fonction.
2. Déterminer la position, la vitesse et l'accélération à $t = 0.6$ s.
3. Quelle est l'accélération lorsque la position est de $x = -0.05$ m ?

Solution

1. En comparant avec l'équation, on en déduit immédiatement que l'amplitude $A = 0.08$ m, et que la pulsation est $\omega = 12$ rad/s. La période est donc $T = \frac{2\pi}{\omega} = 0.524$ s . La constante de phase est $\varphi = +0.3$ rad/s et donc la courbe sera décalée de $0.3/12 = 0.025$ s vers la gauche par rapport à un sinus non décalé.
2. La vitesse et l'accélération à un instant quelconque sont données par

$$v(t) = x' = A\omega\cos(\omega t + \varphi) = 0.96\cos(12t + 0.3) \text{ m/s}$$

$$a(t) = x'' = -A\omega^2\sin(\omega t + \varphi) = -11.52\sin(12t + 0.3) \text{ m/s}^2$$

   A $t = 0.6$ s, la phase du mouvement est $(12 \times 0.6 + 0.3) = 7.5$ rad. Lorsqu'on utilise cette valeur dans les expressions données, on trouve $x = 0.075$ m, $v = 0.333$ m/s et $a = -10.8$ m/s^2
3. On sait que $a = -\omega^2 x = -12^2 \times (-0.05) = 7.2$ m/s^2

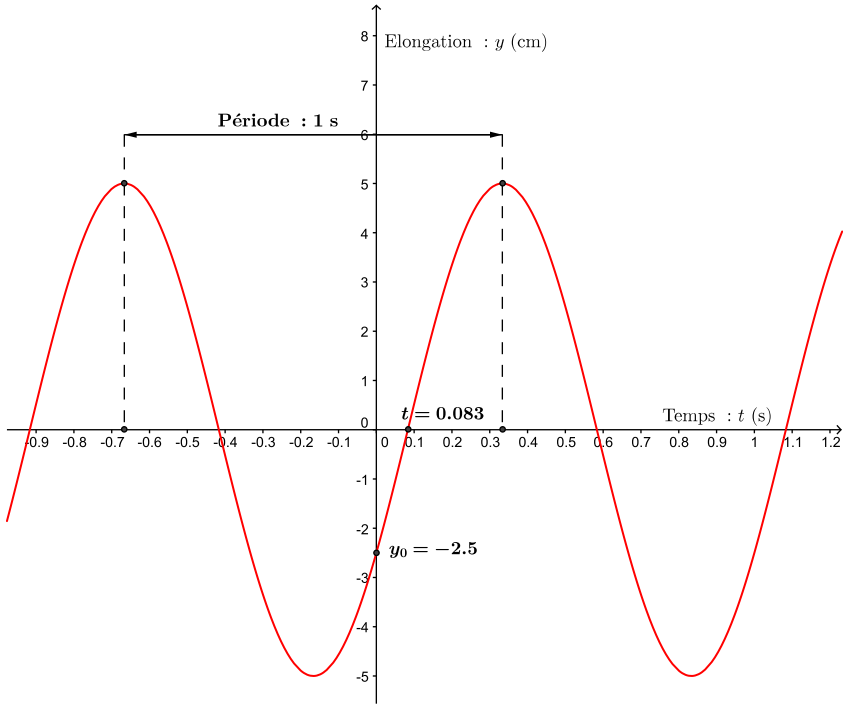


FIGURE 2.7 – Determiner l'équation du mouvement à partir du graphe.

Exemple Déterminer les caractéristiques et l'équation du mouvement d'un pendule dont le graphe est donné à la figure 2.7.

- On lit la période sur le graphe : $T = 1$ s.
- La fréquence est donc de $f = \frac{1}{T} = 1$ Hz.
- La pulsation est alors $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = 1$ rad/s.
- L'amplitude du mouvement est la valeur maximale de l'élongation $A = 5$ cm.
- La phase à l'origine φ peut s'obtenir de deux façons :
  - Soit à partir de l'ordonnée à l'origine $y_0 = -2.5$ car si $t = 0$ alors $y_0 = A\sin\varphi \Rightarrow \sin\varphi = \frac{y_0}{A} = -0.5 \Rightarrow \varphi = -\frac{\pi}{6}$.
  - Soit à partir de la première racine $t = 0.0833$ de la fonction, $y = 0 \Rightarrow \sin\omega t + \varphi = 0 \Rightarrow \varphi = -\omega t = -2\pi \times 0.0833 \cong \frac{\pi}{6}$

L'équation du mouvement est donc $y = 5\sin(\omega t - \frac{\pi}{6})$

Exemple Une tache lumineuse sur l'écran d'un ordinateur oscille le long d'une ligne droite horizontale d'un mouvement sinusoïdal à la fréquence de 1.5 Hz. La longueur totale de la ligne parcourue est de 20 cm et la tache commence le mouvement à droite de l'écran. Déterminer :

1. Sa pulsation ;
2. Sa période ;
3. Sa vitesse maximale ;
4. Son accélération maximale ;

5. Exprimer la position horizontale (x) en fonction du temps et trouver la position de la tache en $t = 0.4$ s.

Solution

1. $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 1.5 = 3\pi$ rad/s
2. $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1.5} = 0.67$ s
3. $x_{max} = A\omega = 2\pi f A = 2\pi \times 1.5 \times 0.1 = 0.94$ m/s
4. $a_{max} = A\omega^2 = A(2\pi f)^2 = 0.1 \times (2 \times \pi \times 1.5)^2 = 8.9$ m/s^2
5. $x = A\sin(\omega t + \varphi)$
   A l'instant $t = 0, x = +A \rightarrow A = A\sin\varphi \rightarrow \varphi = \frac{\pi}{2}$

$$\rightarrow x = 0.1\sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{2}\right) = 0.1\sin\pi\left(3t + \frac{1}{2}\right)$$

   A l'instant $t = 0.4\ s \rightarrow x = 0.1\sin\pi(3 \times 0.4 + 0.5) = -0.081 = -8.1$ cm

2.2.3 Energie d'un oscillateur

L'énergie totale d'un oscillateur est la somme des énergies cinétique et potentielle. Pour un oscillateur, il y a au cours du mouvement une transformation continue de l'énergie cinétique en énergie potentielle et vice et versa. Considérons le cas idéal où il n'y a pas de frottement, alors l'énergie totale est constante et évaluons l'énergie totale grâce à cette propriété.

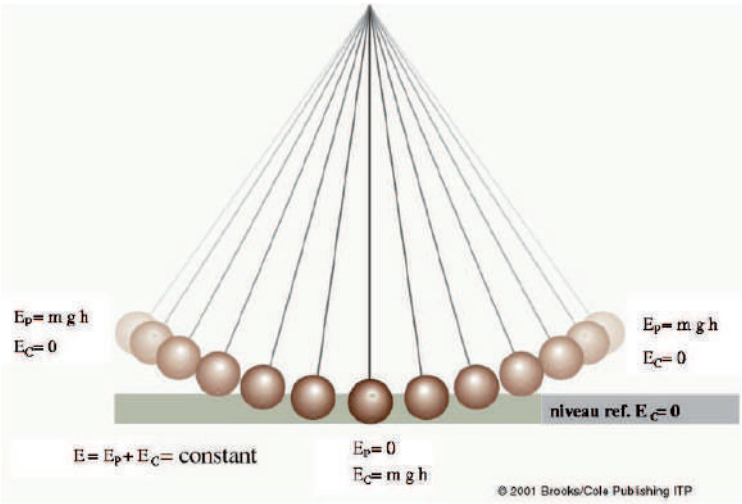


FIGURE 2.8 – Dans le cas d'un pendule idéal, la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie mécanique reste constante. Au point le plus bas, toute l'énergie est sous forme d'énergie cinétique et au point le plus haut toute l'énergie est sous forme d'énergie potentielle.

A tout instant : $E_{\text{mécanique}} = E_{potentielle} + E_{\text{cinétique}}$ avec $E_{\text{mécanique}} = mgh$ et $E_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2}mv^2$. Prenons par exemple le cas du pendule (Voir figure 2.8), lorsque l'élongation $y = 0$;

l'énergie cinétique est maximale et l'énergie potentielle est nulle, donc : $E = \frac{1}{2}mv^2 + 0$ or $v_{max}^2 = \omega^2 A^2$. Finalement, l'énergie d'un oscillateur est donnée par la formule :

$$E = \frac{1}{2}m.\omega^2.A^2 = 2\pi^2.m.f^2.A^2 \tag{2.7}$$

Conclusion : L'énergie d'un oscillateur est fonction de l'amplitude A et de la fréquence f de l'oscillation.

Exemple Soit une masse de 200 g animé d'un mouvement d'oscillation d'équation : $y = 0.5\sin(3\pi t)$. Quelle est l'énergie de cet oscillateur ?

Solution

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \times (3\pi)^2 \times 0.5^2 = 9.13\ J$$

2.2.4 Mouvement vibratoire amorti

Si on observe des oscillations sur une longue période, on remarque une diminution progressive de l'amplitude ; on dit que les oscillations sont amorties. Cet amortissement est dû aux frottements qui ne sont jamais nuls et l'énergie initiale se dissipe en chaleur. Une diminution progressive de l'énergie mécanique du pendule entraîne une diminution de son amplitude sans rien changer à son rythme d'oscillation. (Voir figure 2.9).

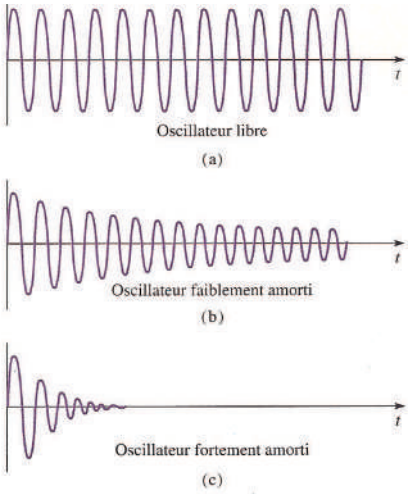


FIGURE 2.9 – (a) Un oscillateur harmonique idéale, sans aucune perte d'énergie, oscille indéfiniment sans diminution d'amplitude. (b) Avec des frottements, l'oscillateur est amorti ; son amplitude diminue avec le temps. (c) Plus grand est l'amortissement, plus rapidement les oscillations sont réduites.

2.2.5 Exemples de MVS

Masse reliée à un ressort

Pour étirer un ressort, il faut une certaine force F. On peut facilement montrer au moyen de quelques expériences que la force F est proportionnelle au déplacement de l'objet à partir de sa position d'équilibre, à condition que la déformation ne soit pas trop

grande. On a alors $F = k\Delta L$. C'est la **loi de Hooke**. ΔL (en m) est le déplacement par rapport à sa position d'équilibre et k (en N/m) est la constante du ressort. La troisième loi de Newton implique alors que le corps déformé exerce une force (Principe des actions réciproques). C'est la **force de rappel**, $F = -k\Delta L$, qui tend à ramener le corps à sa position d'équilibre.(Voir figure 2.10).

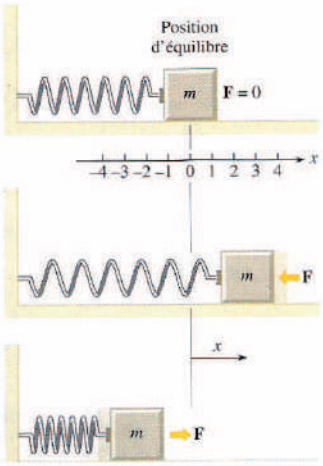


FIGURE 2.10 – Une masse attachée à un ressort vibrant horizontalement. Ici, F est la force exercée par le ressort et il n'y a aucun frottement

Masse suspendue à un ressort

Une bande élastique suspendue à un crochet s'allonge d'une longueur L, si elle porte une masse m. (Voir figure 2.11). Alors la force de rappel vers le haut est égale au poids vers le bas : $k\Delta L = mg$, c'est à dire que la force de rappel exercée par la bande élastique est proportionnelle à l'élongation : $F = -ky$. (k est la constante de rappel du ressort.)

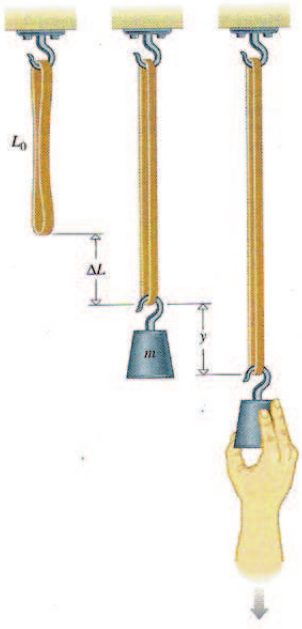


FIGURE 2.11 – Si on suspend une masse m à une bande élastique, celle-ci s'étire d'une longueur ΔL jusqu'à une nouvelle position d'équilibre. Si on la tire davantage vers le bas, la bande s'allonge d'une distance y. Quand la masse est lâchée, le système oscille d'un mouvement sinusoïdale, à condition que le déplacement soit faible et la force de rappel soit proportionnelle au déplacement

Dans ces conditions, l'objet écarté de sa position initiale se met à osciller avec un mouvement vibratoire sinusoïdal de période propre :

$$k = m\omega^2 = m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \rightarrow \boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}} \tag{2.8}$$

Plus la constante k du ressort est élevée, plus le ressort est raide et plus courte est la période. Plus la masse est élevée et plus la période est élevée.

Exemple Un ressort hélicoïdal vertical en acier s'allonge de 50.0 cm s'il porte un sac de bonbons de 2,0 kg. Le sac est alors à 1.00 m au-dessus de la tête d'un enfant. Le sac est tiré vers le bas de 25,0 cm puis lâché. Combien de temps faut-il pour qu'il revienne à la même hauteur de 1,00 m au dessus-de l'enfant ?

Solution Le sac est en équilibre quand la masse est à 1.00 m au-dessus de l'enfant. Le point le plus bas (0.75 cm au-dessus de l'enfant) est la position initiale ($y = A$) du sac. Celui-ci revient à la position d'équilibre au bout d'un quart de période, soit $t = T/4$. Pour trouver T, nous devons d'abord trouver k. Initialement : $k = \frac{mg}{\Delta L} = \frac{2.0\times 9.81}{0.5} = 39.2$ N/m
Donc : $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2.0}{39.2}} = 1.4\ s \rightarrow \frac{T}{4} = 0.35$ s

Exemple Un bloc de 2 kg est attaché à un ressort pour lequel $k = 200$ N/m. On l'allonge de 5 cm et on le lâche à $t = 0$. Trouver :

1. L'équation de la position du bloc en fonction du temps ;
2. Sa vitesse lorsque $x = A/2$;
3. Quelle est la force sur le bloc pour $t = \pi/15$ s ?
4. A quelle instant t le bloc passe-t-il pour la première fois à $x = -A/2$?

Solution

1. Nous avons besoin de déterminer A, ω et φ dans l'équation $x(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$. L'amplitude est l'allongement maximal du ressort, c'est-à-dire $A = 0.05$ m. Donc $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 10$ rad/s.
2. Pour trouver φ, on remarque que pour $t = 0$, on nous donne $x = +A$. On a donc, $A = A\sin(0 + \varphi)$ (L'élongation est maximale) et $0 = 10A\cos(0 + \varphi)$ (La vitesse est nulle). Autrement dit, $\sin\varphi = 1$ et $\cos\varphi = 0$, c'est-à-dire $\varphi = \pi/2$. Finalement,
$$x = 0.05\sin\left(10t + \frac{\pi}{2}\right)$$
où x est en mètres et t en secondes.
3. Pour trouver la vitesse, nous devons déterminer à quel instant $x = A/2$, ce qui donne l'équation :
$$\frac{0.05}{2} = 0.05\sin\left(10t + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \sin\left(10t + \frac{\pi}{2}\right) = 0.5$$
Cette équation possède deux solutions 0.52 rad et 2.62 rad (Les sinus d'angles supplémentaires sont égaux).

(a) Soit donc $10t + \frac{\pi}{2} = 0.52$ rad. La vitesse est alors

$$v = 0.5\cos(10t + \frac{\pi}{2}) = 0.5\cos 0.52 \Rightarrow v = +0.434\ m/s$$

(b) Soit maintenant $10t + \frac{\pi}{2} = 2.52$ rad. La vitesse est alors

$$v = 0.5\cos(10t + \frac{\pi}{2}) = 0.5\cos 2.52 \Rightarrow v = -0.434\ m/s$$

Pour une position donnée, on trouve deux vitesses de même module et de sens opposées.

4. L'accélération en $x = A/2$ est facilement déterminée à partir de :

$$a = -\omega^2 x = -10 \times \frac{0.05}{2} = -2.5\ m/s^2$$

Le pendule

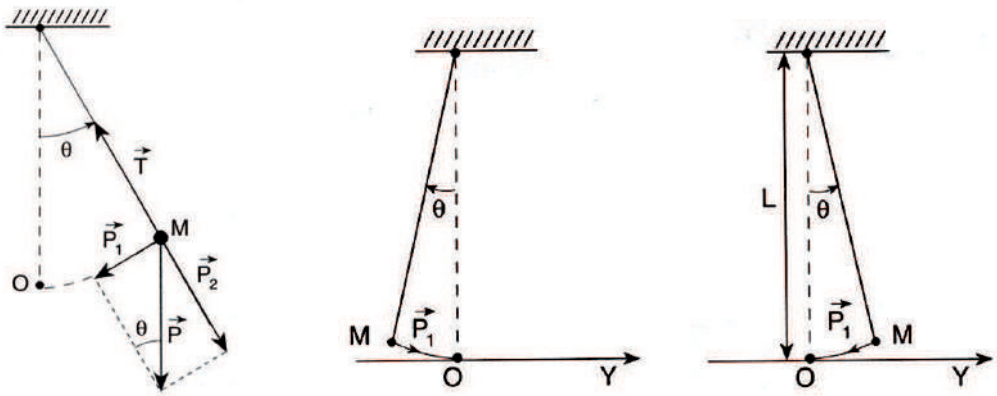


FIGURE 2.12 – Le pendule simple a) Les seules forces qui agissent sur le pendule sont la force poids $\vec{P}$ et la traction du fil $\vec{T}$, b) et c) La résultante est la force $\vec{P_1}$ qui tend toujours à ramener le pendule à sa position d'équilibre.

Il est constitué d'une masse m suspendue à un fil inextensible de longueur L. (Voir figure 2.12) Sur la masse agissent deux forces, le poids $\vec{P}$ et la traction du fil $\vec{T}$. Le poids peut être décomposé en une composante $\vec{P_1}$ tangente à la trajectoire et une composante $\vec{P_2}$ qui lui est perpendiculaire. La résultante de $\vec{T}$ et de $\vec{P}$ est perpendiculaire à la trajectoire et fait changer la direction du mouvement (mouvement circulaire). $\vec{P_1}$ est donc la seule force à faire varier la grandeur de la vitesse et à ramener la masse vers sa position d'équilibre en O.

$$P_1 = mg\sin\theta$$

Pour des oscillations de faibles amplitudes ($\theta < 10°$) alors, à condition d'exprimer les angles en radians, $\theta = \sin\theta$. De plus, si OM est la longueur de l'arc, alors $\theta = \frac{OM}{L}$. Mais comme pour de faibles angles, la corde se confond avec l'arc, $y \approx OM$, nous pouvons écrire : $\theta = \frac{y}{L}\theta$ et la force $P_1 = mg\frac{y}{L}$. En remarquant que y et F sont toujours de signe contraire, nous avons : $F = -mg\frac{y}{L} = -ky$. La force F est une force de rappel proportionnelle à y et

de signe contraire. Dans ces conditions, le mouvement d'un pendule de faible amplitude est donc un MVS avec une période propre T qui est donnée par :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \text{ avec } k = \frac{mg}{L} \Rightarrow \boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}}$$

En tout point du globe, la période propre d'un pendule ne dépend que de sa longueur (par sa racine) et pas de sa masse. De plus, nous pouvons nous servir du pendule pour mesurer g en tout point de la Terre. $(g = 4\pi^2 L/T^2)$.

FIGURE 2.13 – Un célèbre expert en matière de pendule.

Exemple Quel doit être la longueur d'un pendule, pour que sa période soit 1.00 s à un endroit où $g = 9.81\text{m/s}^2$?

Solution

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow L = \frac{T^2 g}{4\pi^2} = \frac{1^2 \times 9.81}{4 \times \pi^2} = 0.248 \text{ m}$$

2.2.6 Les applications du pendule

Il est particulièrement surprenant qu'un instrument aussi simple que le pendule ait eu autant de conséquences dans l'histoire. Il suffit de voir le nombre considérable de travaux qui ont été fait sur le pendule, plus exactement sur les pendules, car le pendule simple se décline en une grande variété de différents types de pendule : le pendule pesant, le pendule de Foucault, le pendule sphérique, le pendule conique, le pendule balistique, le pendule de Mach, le pendule de torsion, etc.

Bien sûr, aujourd'hui, nous disposons d'instruments modernes beaucoup plus performants que le simple pendule. Pour illustrer les possibilités du pendule prenons quelques exemples.

– La mesure du temps. [3]

3. Mesure du temps : La première définition de la seconde fut la demi-période d'un pendule d'un mètre de long (aujourd'hui, la seconde n'est plus définie mécaniquement, mais par un nombre bien défini de périodes d'une transition dans un atome de césium). Avoir une méthode fiable, répétitive et précise pour mesurer le temps a eu une importance capitale dans le développement des sciences et du commerce.

- Mesure de la longitude. [4]
- Démonstration de la rotation de la Terre. [5]
- Démonstration que la Terre n'est pas parfaitement ronde. [6]
- Mesure de la masse de la Terre. [7]
- Les sismomètres. [8]
- Le pendule balistique : Le pendule balistique, mis au point en 1742 par Benjamin Robins, est un dispositif permettant de mesurer la vitesse d'un projectile à partir de son impact sur un pendule en supposant le choc parfaitement inélastique. L'étude du mouvement du pendule suite à l'impact permet, grâce à la loi de conservation de la quantité de mouvement, de déterminer la percussion mécanique du projectile et sa vitesse. À l'origine, il était destiné à mesurer la vitesse pour des balles de fusil, on s'en sert encore parfois de cette manière, mais pour la mesure des autres mouvements, la chronophotographie a remplacé cet instrument. L'exemple suivant va illustrer le concept.

Exemple : le pendule balistique Une balle de 9 mm Parabellum de masse $m_b = 9$ g frappe un pendule balistique constitué par un pendule simple de longueur $L = 2$ m et de

4. Mesure de la longitude : La mesure du temps dans la marine est indispensable, comme le montre l'exemple de Christophe Colomb. En particulier la détermination de la longitude impose de conserver à bord l'heure du port de départ. À tel point qu'au début du XVIIIe siècle les gouvernements britannique et espagnol offrirent de fortes récompenses au savant qui réussirait à construire un chronomètre transportable ayant une précision et, surtout, une stabilité suffisante pour faire un point complet en mer. Car il est impossible de faire fonctionner un pendule sur un bateau à cause du roulis. Un tel instrument de mesure est inventé par l'horloger britannique John Harrison en 1737. Il crée un énorme chronomètre d'une précision et d'une stabilité étonnantes. Il remporte le prix en 1764 seulement avec son quatrième prototype, beaucoup plus compact dans sa forme, et qui, en deux mois de voyage, ne se sera décalé que de quelques secondes, performance jamais atteinte jusque-là. Selon certaines sources, ce serait plutôt Christian Huygens qui en 1695 aurait mis au point la première horloge marine. Actuellement, l'utilisation du GSP a envoyé ces anciennes techniques dans le rayon des antiquités.

5. Démonstration de la rotation de la Terre : La première démonstration publique date de 1851, le pendule étant accroché à la voûte du Panthéon de Paris. L'intérêt du pendule, imaginé et réalisé par Foucault, est qu'il met en évidence la rotation de la Terre par une expérience locale aisément reproductible et que l'on peut également déterminer en quelques heures, par mesure de la déviation au sol du plan d'oscillation, la latitude du lieu de l'expérience sans aucune observation astronomique extérieure.

6. Rotondité de la Terre : Si on mesure la gravité aux pôles et à l'équateur, on note une différence qui montre que la Terre est plus aplatie au pôles. Pour ce genre de mesure, il faut évidemment tenir compte de l'effet de la rotation de la Terre à l'équateur.

7. Masse de la Terre : Le pendule simple permet de peser la Terre!!. On peut déterminer GM ($G =$ constante de gravitation, $M =$ masse de la Terre) au moyen de mesures pendulaires. En simplifiant un peu, on néglige la force centrifuge et on suppose la Terre sphérique. L'intensité de l'accélération gravifique à la surface terrestre vaut alors $g = \frac{GM}{R^2}$, où R est le rayon moyen de la Terre. Pour un pendule simple de longueur l, cette accélération produit une période d'oscillation $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Par conséquent, une connaissance de la longueur l et une mesure de la période T permet de déterminer le produit GM au moyen de la formule $GM = \frac{4\pi^2 l R^2}{T^2}$

8. Les sismomètres : Le premier appareil de détection des tremblements de terre, connu, est le sismoscope du sismologue Chinois, CHAN HEN (132 après Jésus Christ). Un sismomètre est un détecteur de mouvements du sol qui comporte un capteur mécanique, un transducteur, un amplificateur et un enregistreur. Les premiers sismomètres étaient des capteurs à inertie ou des pendules. La masse d'inertie pouvait être très élevée : à la station historique de Strasbourg, devenue Musée de Sismologie et Magnétisme terrestre, l'un des sismomètres a une masse de 19 tonnes. Actuellement on utilise surtout des sismomètres électromagnétiques. Ils ne mesurent pas le mouvement du sol mais la vitesse de mouvement du sol.

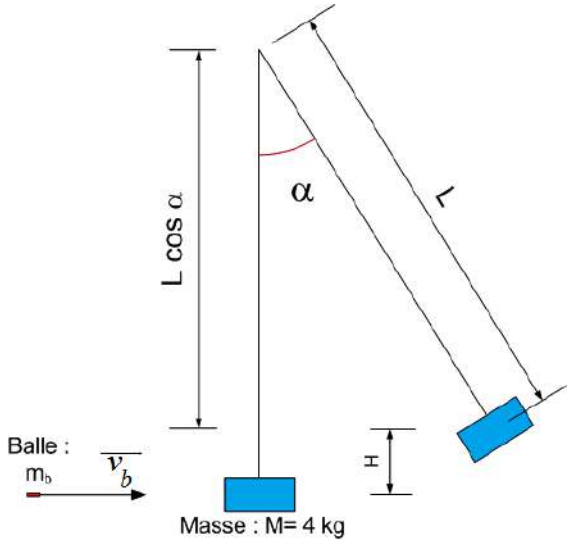


FIGURE 2.14 – Pendule balistique : une balle de masse m_b de de vitesse v_b percute et s'enfonce dans une masse M d'un pendule de longueur L considéré comme simple. Sous l'impact de la balle, la masse M remonte à une hauteur H. Le fil du pendule fait alors en angle α avec la verticale.

masse $M = 4$ kg. Sous le choc, le pendule de déplace d'un angle de 10°. Déterminer la vitesse de la balle. (Voir figure 2.14)

Solution On a :

$$H = L(1 - \cos\alpha)$$

L'énergie potentielle est égale à l'énergie cinétique :

$$MgH = \frac{1}{2}Mv^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)}$$

Lors du choc entre la balle et la masse la quantité de mouvement se conserve et donc :

$$v_b.m_b = v.M \quad \Rightarrow \quad v_b = \frac{M}{m_b}\sqrt{2gL(1 - \cos\alpha)}$$

Remplaçons par les données :

$$v_b = \frac{5}{0.008}\sqrt{2 \times 9.81 \times 2(1 - \cos 10°)} = 386 \text{ m/s}$$

2.3 Composition de deux MVS

2.3.1 Le vecteur de Fresnel

C'est la représentation graphique de la fonction $y = A\sin(\omega t + \varphi)$

Pour représenter graphiquement ces trois caractéristiques, il suffit de dessiner un vecteur $\vec{A}$ de longueur égale à l'amplitude A qui tourne à la vitesse angulaire ω faisant en $t = 0$, un angle φ avec l'axe X. Le vecteur $\vec{A}$ est appelé vecteur de Fresnel. (Voir figure 2.15).

Pour définir complètement un mouvement harmonique, il faut préciser trois caractéristiques :

1. l'ampleur des oscillations par l'amplitude A ;
2. le rythme des oscillations par f, T ou ω ;
3. la position initiale par φ

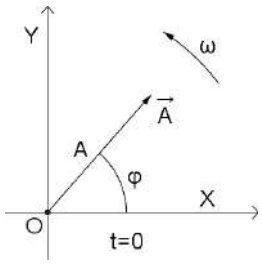


FIGURE 2.15 – Le vecteur de Fresnel

FIGURE 2.16 – **Augustin Jean Fresnel**, né le 10 mai 1788 à Broglie et mort le 14 juillet 1827 à Ville-d'Avray, est un physicien français. Fondateur de l'optique moderne, il proposa une explication de tous les phénomènes optiques dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière.

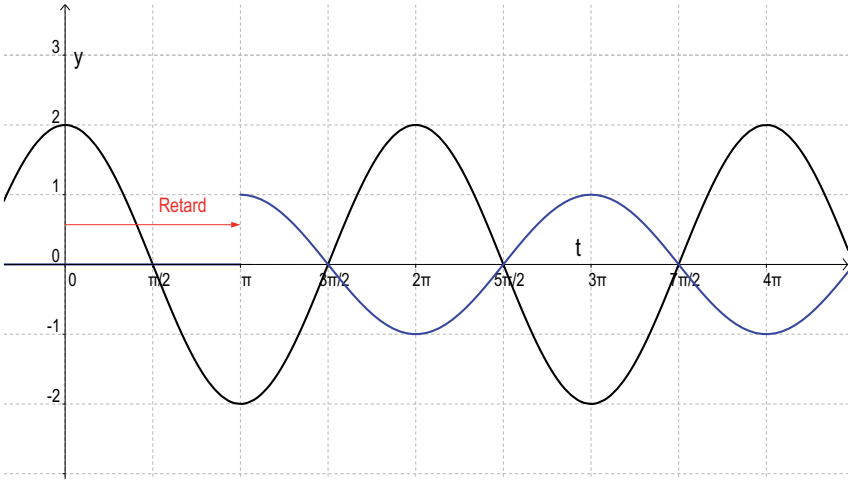


FIGURE 2.17 – Deux MVS, l'un en retard par rapport à l'autre. Sur le graphique, on lit que le déphasage est π car la même élongation est atteinte par le deuxième mouvement π s après le premier.

2.3.2 Déphasage entre deux MVS

Si deux pendules, **de même fréquence**, sont lâchés à des instants différents, leurs élongations sont déphasées. Soient deux MVS d'équation $y_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ et $y_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$. Ces deux mouvements peuvent se représenter par leur vecteur de Fresnel. A l'instant $t = 0$, les phases sont φ_1 et φ_2. Si $\varphi_1 > \varphi_2$, on dit que y_1 est **en avance** par rapport à y_2. Evidemment, cela revient à dire que y_2 est **en retard** par rapport à y_1. Un mouvement est en retard ou en avance sur l'autre. (Voir figure 2.17). Rappelons aussi que la phase étant un angle, elle est définie à 2π près. On peut donc enlever ou ajouter autant de fois 2π que l'on veut. Il est donc possible d'obtenir un angle situé entre $-\pi$ et $+\pi$. Il

en est de même pour $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.
On retiendra :

1. Si $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 > 0$ alors y_1 est en **avance de phase** sur y_2.
2. Si $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 < 0$ alors y_1 est en **retard de phase** sur y_2.

On appelle **déphasage** entre deux oscillateurs la différence $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = \varphi$. Les cas particuliers suivants sont rencontrés fréquemment :

- Si $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = 0$ ou $2k\pi$, les deux oscillateurs sont en **phase** ou en **concordance de phase**. (Voir figure 2.18).
- Si $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = \frac{\pi}{2}$ ou $(2k+1)\frac{\pi}{2}$, les deux oscillateurs sont en **quadrature**.
- Si $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = \pi$ ou $(2k+1)\pi$, les deux oscillateurs sont en **opposition de phase**. (Voir figure 2.19).

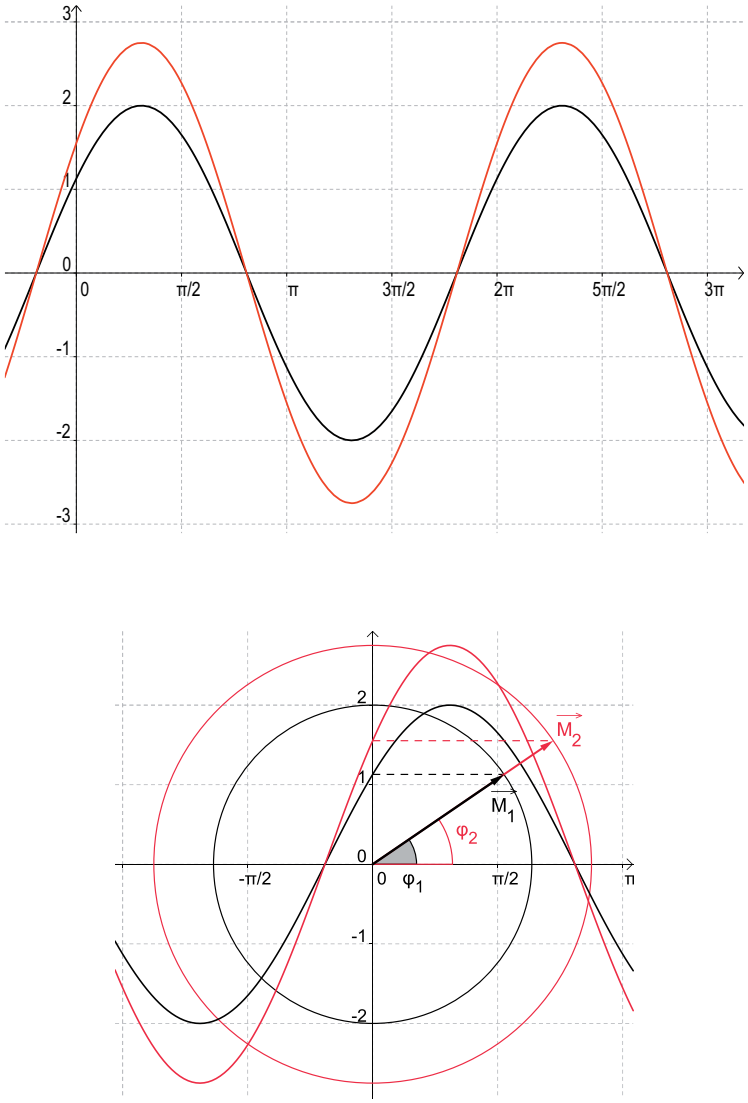


FIGURE 2.18 – (a) deux MVS en concordance de phase. (b) Construction des vecteurs de Fresnel correspondants à ces deux mouvements. Les deux vecteurs sont de même direction et de même sens.

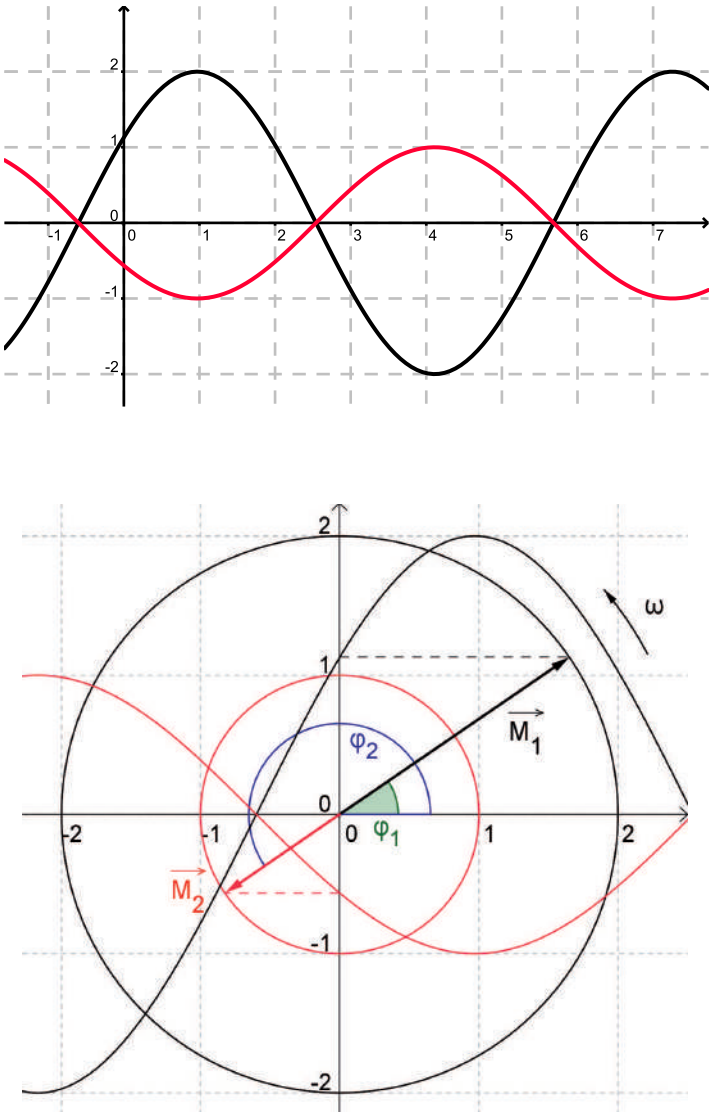


FIGURE 2.19 – (a) Deux MVS en opposition de phase. (b) Construction des vecteurs de Fresnel correspondants à ces deux mouvements. Les deux vecteurs sont de même direction et de sens contraire.

2.3.3 Composition de deux MVS de même fréquence

Introduction

Nous n'étudierons que la composition de deux MVS de même fréquence ou bien de même période. Les cas où les fréquences des deux MVS sont différentes ne font pas partie du programme.

Supposons qu'un point soit animé simultanément par deux MVS dont la loi est connue. Chacun de ces deux MVS étant appelés mouvements **composants** c'est à dire que c'est le mouvement que possèderait le point si l'autre mouvement n'existait pas. Déterminons les caractéristiques du mouvement **résultant** c'est à dire la loi du mouvement qu'effectue réellement le point sous l'effet combiné des deux mouvements composants.

La pulsation est $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$. Appelons A_l, A_2, φ_1, φ_2 les amplitudes et les phases à l'origine des deux mouvements. On a $y_1 = A_1 \sin(\omega\ t + \varphi_1)$ et $y_2 = A_2 \sin(\omega\ t + \varphi_2)$

Le *principe de superposition* consiste à dire que si deux causes interviennent en même temps, le déplacement imposé au point est égal à la somme géométrique des deux déplacements qu'imposeraient respectivement les deux causes en intervenant séparément.

Méthode de Fresnel

Nous résolvons le problème par une simple construction géométrique basée sur les vecteurs de Fresnel. Associons le vecteur $\vec{A_1}$, dont l'extrémité est le point A_1, au mouvement y_1 et le vecteur $\vec{A_2}$, dont l'extrémité est le point A_2, au mouvement y_2.

Conformément au principe de superposition, le mouvement résultant a même direction que les 2 mouvements composants et l'élongation résultante est $y = y_1 + y_2$. (Voir figure 2.20). Pour faire cette somme de 2 fonctions sinusoïdales, regardons le vecteur $\vec{A}$, somme vectorielle de $\vec{A_1}$ et $\vec{A_2}$. Comme A_1, A_2, φ_1, φ_2 sont des constantes, le parallélogramme OA_lAA_2 tourne sans se déformer et le vecteur $\vec{A}$ tourne aussi avec la vitesse ω et si φ désigne sa phase à l'origine, la projection de $\vec{A}$ sur l'axe y est bien la fonction sinusoïdale que l'on cherche.

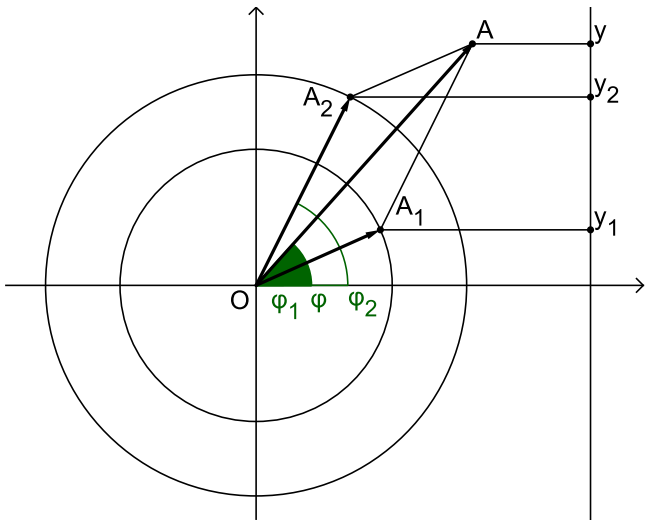


FIGURE 2.20 – Construction du MVS résultant par la méthode des vecteurs de Fresnel. Par application du principe de superposition, le vecteur $\vec{A}$ est la somme des vecteurs $\vec{A_1}$ et $\vec{A_2}$

Le mouvement résultant est donc sinusoïdal, de pulsation φ et de loi $y = A \sin(\omega t + \varphi)$. **La somme de 2 fonctions sinusoïdales de même fréquence f est encore une fonction sinusoïdale de même fréquence f.**

Il est facile de démontrer les deux formules suivantes permettant de trouver l'amplitude résultante A et la phase à l'origine φ par l'intermédiaire de sa tangente.

$$y = A \sin(\omega t + \varphi)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$\tan\varphi = \frac{A_1.\sin\varphi_1 + A_2.\sin\varphi_2}{A_1.\cos\varphi_1 + A_2.\cos\varphi_2}$$

(Le lecteur est encouragé à faire ces démonstrations).

Exemple Soient les deux MVS donnés par les équations $y_1 = 3\sin\left(12t + \frac{\pi}{6}\right)$ et $y_2 = 4\sin\left(12t + \frac{6\pi}{7}\right)$; Etablir l'équation du mouvement résultant. L'amplitude est donnée en cm

Solution Figure 2.21. L'amplitude résultante est :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)} = \sqrt{3^2 + 4^2 + 2 \times 3 \times 4 \times \cos\left(\frac{\pi}{6} - \frac{6\pi}{7}\right)} = 3.39 \text{ cm}$$

La phase résultante peut se calculer de deux façons différentes. Soit on applique directement la formule :

$$\tan\varphi = \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2} = \frac{3\sin\frac{\pi}{6} + 4\sin\frac{6\pi}{7}}{3\cos\frac{\pi}{6} + 4\cos\frac{6\pi}{7}} = -3.217 \rightarrow \varphi = 1.87 \text{ rad}$$

Ou bien on résout le triangle OAA_1 :

$$\cos\left(\varphi - \varphi_1\right) = \frac{A^2 + A_1^2 - A_2^2}{2A.A_1} = \frac{3.39^2 + 3^2 - 4^2}{2 \times 3.39 \times 3} = 0.22085 \rightarrow \left(\varphi - \varphi_1\right) = 1.348$$
$$\rightarrow \varphi = 1.348 + \frac{\pi}{6} = 1.87 \text{ rad}$$

Finalement, l'équation du mouvement est : $y = 3.39\sin\left(12t + 1.87\right)$

Composition de deux MVS en concordance de phase

Si les mouvements sont en concordance de phase, c'est-à-dire si $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = 0$ ou $2k\pi$, la construction de Fresnel montre que $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$ devient $M = M_1 + M_2$. Autrement dit, l'amplitude du mouvement résultant est simplement la somme des amplitudes des deux MVS. Dans le cas où les mouvements sont identiques, nous en déduisons que l'amplitude du mouvement résultant est simplement le double de l'amplitude des mouvements composants. (Voir figure 2.22).

Composition de deux MVS en opposition de phase

Si les mouvements sont en opposition de phase, c'est-à-dire si $\mid \varphi_1 - \varphi_2 \mid = \pi$ ou $\left(2k + 1\right)\pi$, la construction de Fresnel montre que $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2$ devient $M = |M_1 - M_2|$. Autrement dit, l'amplitude du mouvement résultant est simplement la valeur absolue de la différence des amplitudes des deux MVS. Dans le cas où les amplitudes mouvements sont égales, nous en déduisons que l'amplitude du mouvement résultant est alors nulle. (Voir figure 2.23).

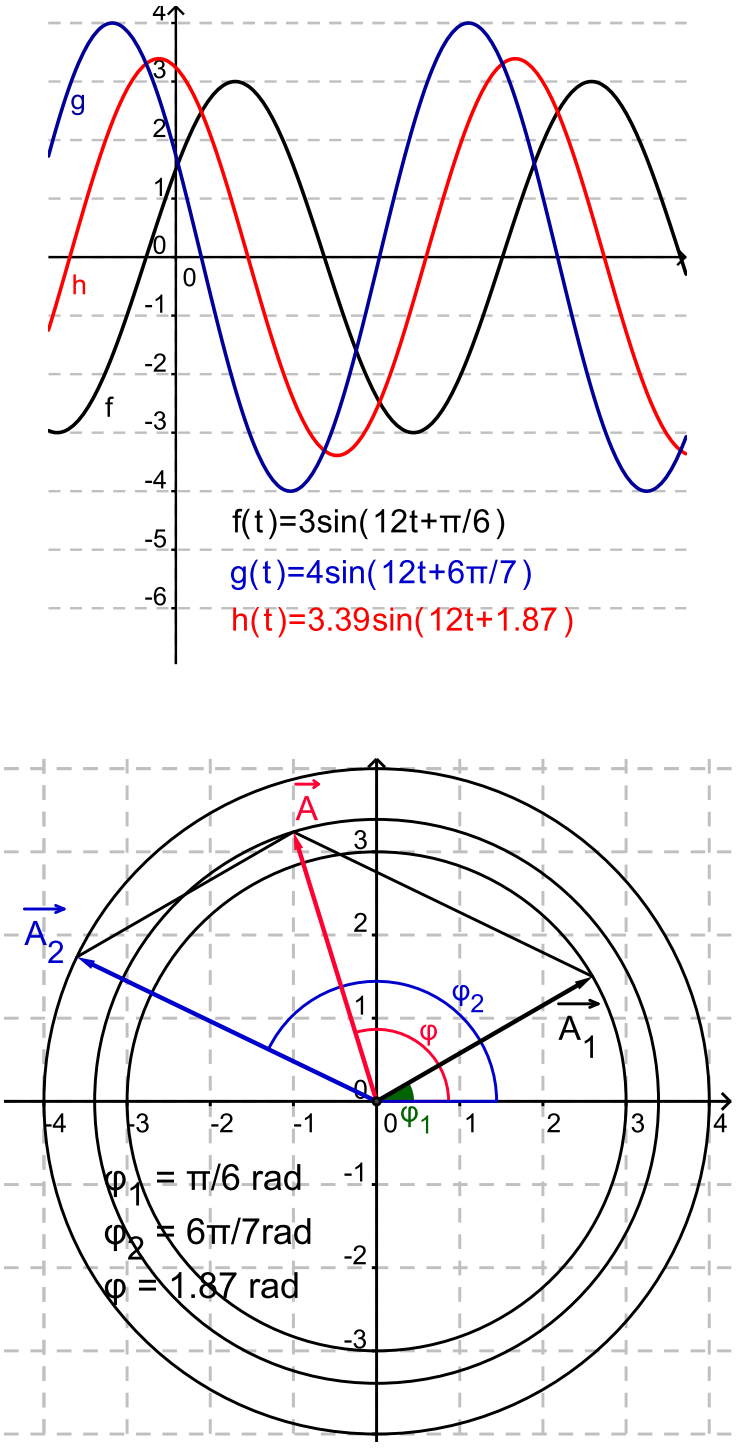
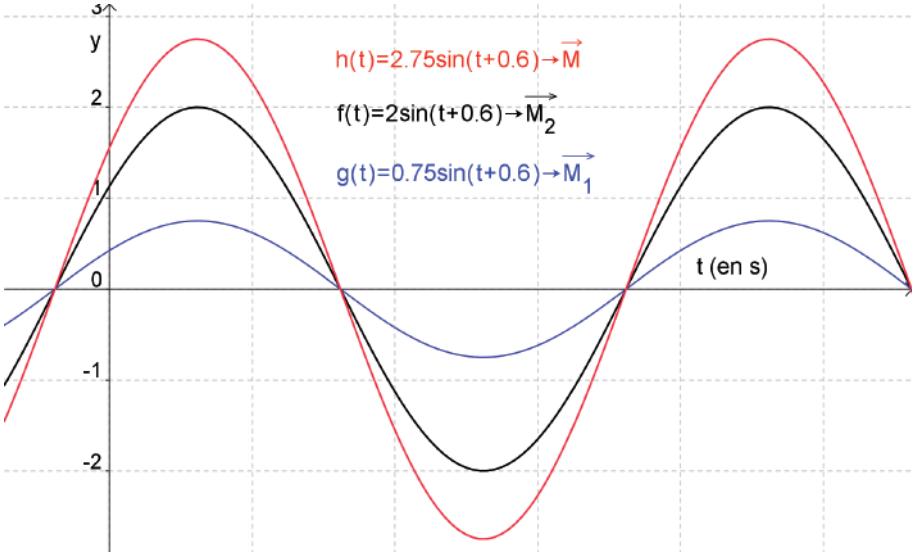


FIGURE 2.21 – (a) Deux MVS $f(t)$ et $g(t)$ et le mouvement résultant $h(t)$. (b) Construction des vecteurs de Fresnel correspondants à ces trois mouvements.



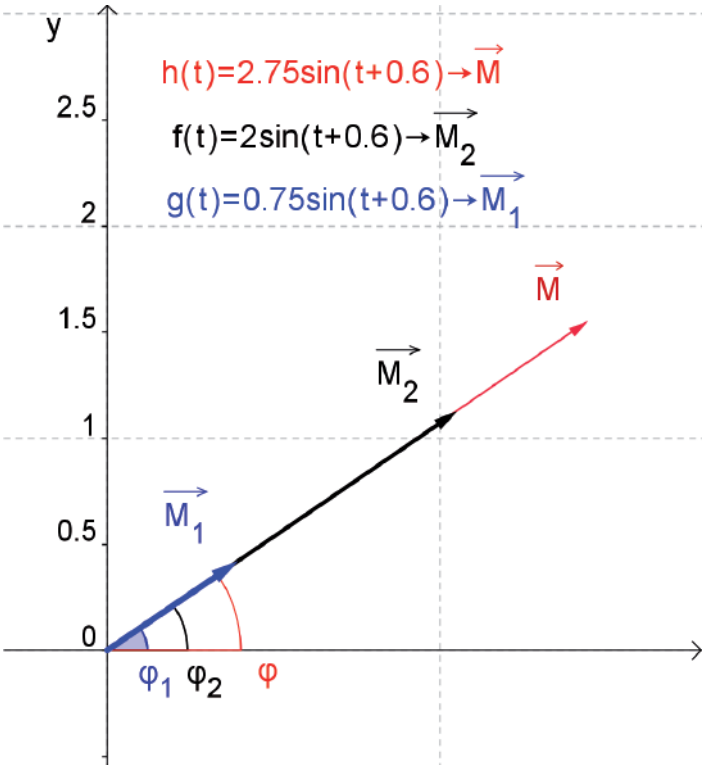


FIGURE 2.22 – (a) 2 MVS d'équation $f(t) = 2\sin(t + 0.6)$ et $g(t) = 0.75\sin(t + 0.6)$ sont en concordance de phase $\varphi = 0.6$ rad. Le mouvement résultant est obtenue en ajoutant à tout instant les élongations de chacun des mouvements composants $h(t) = 2.75\sin(t + 0.6)$. (b) La construction de Fresnel montre que le mouvement résultant, représenté par $\vec{M}$ est bien la somme des mouvements composants, représentés par $\vec{M}_1$ et $\vec{M}_2$ et nous avons $\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 \rightarrow M = M_1 + M_2$.

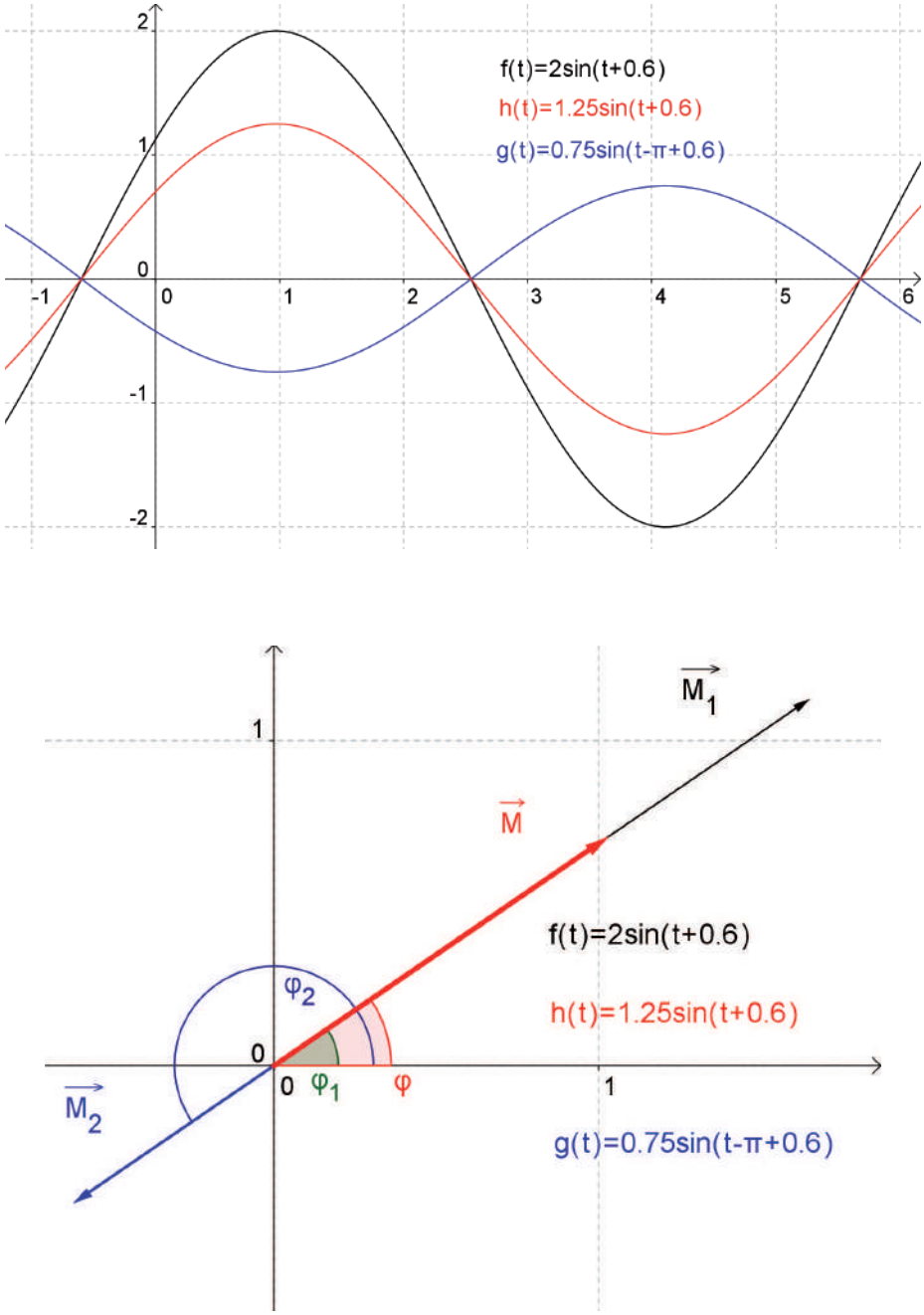


FIGURE 2.23 – (a) 2 MVS d'équation $f(t) = 2\sin(t+0.6)$ et $g(t) = 0.75\sin(t-\pi+0.6)$ sont en opposition de phase car $0.6-(-\pi+0.6) = \pi$ rad. Le mouvement résultant est obtenue en soustrayant à tout instant les élongations de chacun des mouvements composants. (b) La construction de Fresnel montre que le mouvement résultant, représenté par $\vec{M}$ est bien la différence des mouvements composants, représentés par $\vec{M_1}$ et $\vec{M_2}$ et nous avons $\vec{M} = \vec{M_1} + \vec{M_2} \rightarrow M = |M_1 - M_2|$. De plus comme $M_1 > M_2$, il est facile de voir que $\varphi = 0.6$ rad.

2.4 Exercices

2.4.1 Exercices résolus

1. Construire la sinusoïde d'équation $y = 2\sin\left(3\,t + \frac{\pi}{2}\right)$

   Solution.

   Figure 2.24. Nous devons faire les manipulations suivantes :

   (a) Construction de la fonction de base $f(x) = \sin(t)$

   (b) Construction de $g(t) = 2\sin(t)$ c-à-d $g(t) = 2f(t)$. Les ordonnées sont multipliées par 2.

   (c) Construction de $h(t) = 2sin(3t)$ c-à-d $h(t) = g(3t)$. Les abscisses sont divisées par 3.

   (d) Construction de $p(t) = 2\sin\left(3t + \frac{\pi}{2}\right)$ c-à-d $p(t) = h(t + \pi/2)$. La fonction $h(t)$ subit une translation vers la gauche de $\pi/2$

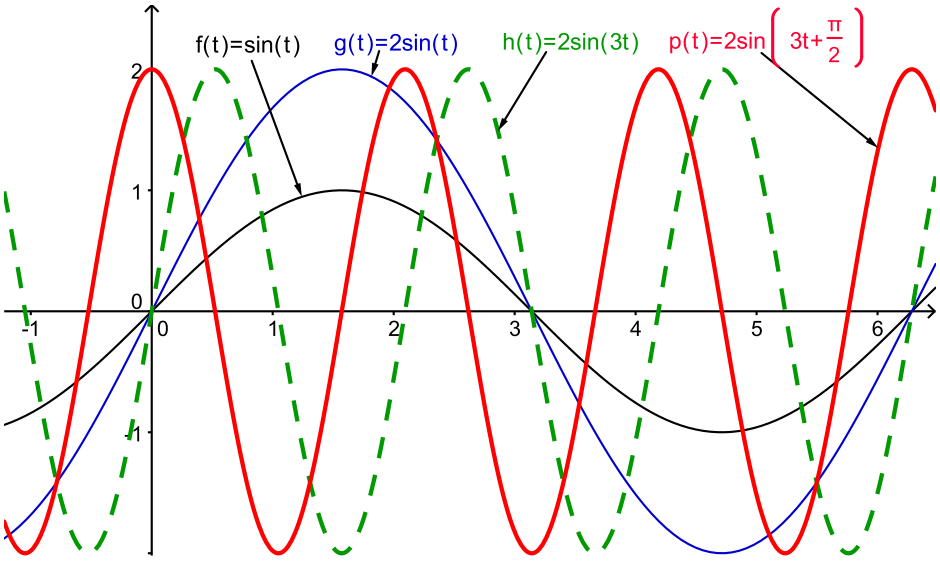


FIGURE 2.24 – Pour construire la sinusoïde demandée, nous utilisons les manipulations de fonctions vues en 4ème. Nous construisons successivement $f(t) = \sin(t)$, puis $g(t) = 2\sin(t)$, ensuite $h(t) = 2sin(3t)$ et finalement $p(t) = 2\sin\left(3t + \frac{\pi}{2}\right)$

2. Construire la sinusoïde d'équation $y = \frac{1}{2}\sin\left(0.8\,t - \frac{\pi}{3}\right)$

   Solution.

   Figure 2.25. Nous devons faire les manipulations suivantes :

   (a) Construction de la fonction de base $f(x) = \sin(t)$

   (b) Construction de $g(t) = \frac{1}{2}\sin(t)$ c-à-d $g(t) = \frac{1}{2}f(t)$. Les ordonnées sont divisées par 2.

(c) Construction de $h(t) = \frac{1}{2}sin(0.8t)$ c-à-d $h(t) = g(0.8t)$. Les abscisses sont multipliées par $\frac{1}{0.8} = 1.25$..

(d) Construction de $p(t) = 2\sin\left(3t - \frac{\pi}{3}\right)$ c-à-d $p(t) = h(t - \pi/3)$. La fonction $h(t)$ subit une translation vers la droite de $\pi/3$

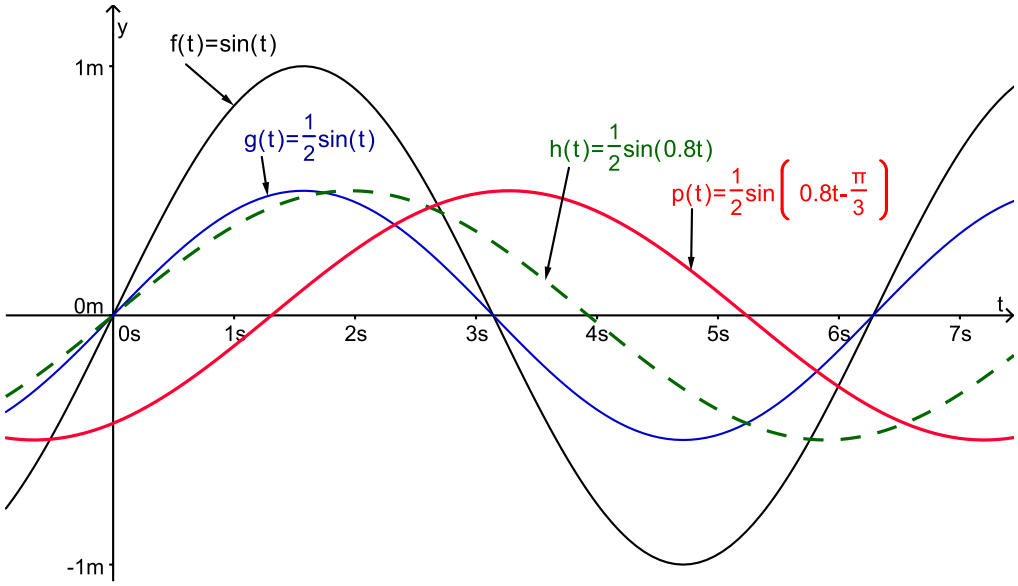


FIGURE 2.25 – Pour construire la sinusoïde demandée, nous utilisons les manipulations de fonctions vues en 4ème. Nous construisons successivement $f(t) = \sin(t)$, puis $g(t) = \frac{1}{2}\sin(t)$, ensuite $h(t) = \frac{1}{2}sin(0.8t)$ et finalement $p(t) = \frac{1}{2}\sin\left(0.8t - \frac{\pi}{3}\right)$

3. L'abscisse Y d'un point animé d'un MVS est $Y = 5\sin(6t)$ (Y en cm et t en s) Déterminer l'amplitude, la pulsation, la fréquence, la phase à l'origine et la période de ce MVS.

Solution.

(a) $Y = A\ \sin(\omega\, t + \varphi)$ ici $Y = 5\sin 6t \rightarrow A = Y_{max} = 5$ cm.

(b) $\omega = 6$ rad/s

(c) $\omega = 2\pi f \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{6}{2\pi} = 0.955$ Hz

(d) $\varphi = 0$

(e) $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.955} = 1.05$ s

4. Ecrire l'équation du MVS d'un mobile sachant qu'en $t = 0$, son élongation est maximale et égale à + 10 cm et que son accélération est de -40 cm/s^2.

Solution.

$$\text{Si } t = 0 \rightarrow \begin{cases} y = y_{max} \rightarrow \begin{cases} A = 10 \text{ cm} \\ \varphi = \dfrac{\pi}{2} \end{cases} \\ a = y'' = -\omega^2 y \rightarrow \omega = \sqrt{\dfrac{-a}{y}} = \sqrt{\dfrac{40}{10}} = 2 \text{ rad/s} \end{cases}$$

Conclusion : $y = 10 \sin\left(2t + \frac{\pi}{2}\right)$

5. Même question que la précédente, sachant que l'amplitude vaut 10 cm, qu'en $t = 0$, son élongation vaut $y = -5$ cm, qu'il va de haut en bas et que sa période est de 2π s.

Solution.

$$\begin{cases} A = 10 \text{ cm} \\ t = 0 \rightarrow y = -5 \text{ cm} \\ T = \dfrac{2\pi}{\omega} \rightarrow \omega = 1 \text{ rad/s} \end{cases} \rightarrow y = A \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow -5 = 10 \sin\varphi \rightarrow \begin{cases} \varphi_1 = -\dfrac{5\pi}{6} \\ \varphi_2 = -\dfrac{\pi}{6} \end{cases}$$

Supposons $\varphi = -\pi/6$
$\rightarrow y = 10 \sin\left(t - \frac{\pi}{6}\right) \rightarrow y' = v = 10 \cos\left(t - \frac{\pi}{6}\right) \rightarrow v(0) = 10 \cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) = 10\frac{\sqrt{3}}{2} > 0$
Supposons $\varphi = -5\pi/6$
$\rightarrow y = 10 \sin\left(t - \frac{5\pi}{6}\right) \rightarrow y' = v = 10 \cos\left(t - \frac{5\pi}{6}\right)$
$\rightarrow v(0) = 10 \cos\left(-\frac{5\pi}{6}\right) = -10\frac{\sqrt{3}}{2} < 0$
Or d'après l'énoncé, $y(0) = -5$ et le mobile va de haut en bas. Autrement dit y s'éloigne de sa position d'équilibre et donc DECROIT $\rightarrow$ v doit être < 0.
Conclusion : $y = 10 \sin\left(t - \frac{5\pi}{6}\right)$

6. Un corps de 400 g est en MVS avec une amplitude de 20 cm, une période 2s et une phase à l'origine nulle. Calculer la vitesse, l'accélération et la force de rappel sur ce corps en $y = 0$, $y = 20$ cm et $y = 5$ cm.

Solution.

$$\begin{cases} A = 20 \text{ cm} \\ T = 2 \text{ s} \rightarrow \omega = \pi \text{ rad/s} \rightarrow y = 0.2 \sin \pi t \\ \varphi = 0 \end{cases}$$

	$y = 0$ m	$y = 0.2$ m	$y = 0.05$ m
t	0 s	0.5 s	$0.05 = 0.2 \sin \pi t \rightarrow t = 0.08$ s
$v = 0.2\pi \cos \pi t$	0.628 m/s	0 m/s	0.608 m/s
$a = -\omega^2 y$	0 m/s^2	-1.97 m/s^2	-0.49 m/s^2
$F = ma$	0 N	-0.788 N	-0.196 N

7. Quelle la période d'un pendule de 1 m de long ?

   Solution.

   $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{1}{9.81}} = 2,0061 \text{ s } \simeq 2 \text{ s}$
   Cette valeur est assez remarquable. On appelle ce pendule le pendule des secondes.

8. Une masse de 500 g est accrochée à un ressort de constante de raideur $k = 12.5$ N/kg et de masse négligeable. On lui communique une énergie de 0.25 J. En $t = 0$ s, sa position est +12 cm et sa vitesse est négative (sens + vers la haut). Ecrire l'équation du mouvement, calculez la position à 10 s et E_C et E_P.

   Solution.

   (a) $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{12.5}{0.5}} = \sqrt{25} = 5$ rad/s.
   Pour déterminer l'amplitude, nous utilisons l'information sur l'énergie :
   $E = 0.25 \text{ J} = E_{C\,max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} \rightarrow 0.25 = \frac{0.5 \times A^2 \times 5^2}{2}$
   $\rightarrow A^2 = \sqrt{\frac{1}{5^2}} \rightarrow A = 0.2$ m
   Pour déterminer la vitesse, nous utilisons l'information sur la position et la vitesse :
   $y(t) = 0.2 \sin(5t + \varphi)$.
   Donc si $t = 0$, $\rightarrow 0.12 = 0.2 \sin \varphi \rightarrow \sin \varphi = \frac{0.12}{0.2} = 0.6 \rightarrow \varphi = \begin{cases} 36.86° \\ \text{ou} \\ 143.13° \end{cases}$
   Or $v = A\omega \cos \varphi$ est négatif, donc $\varphi = 143.13° = 2.5$ rad
   $\rightarrow$ $\boxed{y(t) = 0.2 \sin(5t + 2.5)}$

   (b) En $t = 10$ s
   $\rightarrow y(t) = 0.2 \sin(5 \times 10 + 2.5) = 0.158$ m
   Et $v(t) = A\omega \cos(\omega t + \varphi) = -0.616$ m/s
   Donc $E_C = \frac{mv^2}{2} = 0.095$ J $\rightarrow E_P = 2.5 - E_C = 2.405$ J.

9. On accroche une masse de 400 g à un ressort de masse négligeable. Si on éloigne de la position d'équilibre la masse, la force nécessaire est de 2 N. En $t = 0$, la masse se trouve en -15 cm et sa vitesse est positive. Donner l'équation du mouvement. Calculer E_C, E_P en $y = -12$ cm.

Solution.

(a) $y(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$
Calcul de ω :
$F_{ressort} = F$ (principe d'action réaction)
$F_{ressort} = -m\omega^2 y \rightarrow 0.2 = 0.4 \times \omega^2 \times 0.2 \rightarrow \omega = 5$ rad/s.
Calcul de φ :
$y(t=0) = -0.15A\sin(\varphi) \rightarrow \sin\varphi = \frac{-0.15}{0.20} = -\frac{3}{4} \rightarrow \varphi = -0.85$ rad Equation du mouvement : $y(t) = 0.2\sin(5t - 085)$

(b) A quelle moment la masse est-elle en $y = -12$ cm ?
$-0.12 = 0.2\sin(5t - 0.85) \rightarrow t = 0.0413$ s.
Vitesse :
$v = 0.2 \times 5 \times \cos(5t - 0.85) \rightarrow v = 0.2 \times 5 \times \cos(5 \times 0.0413 - 0.85) = 0.8$ m/s.
Energies :
$E_C = \frac{mv^2}{2} = \frac{0.4 \times 0.8^2}{2} = 0.128$ J.
$E_{tot} = E_{C\,max} = \frac{mv_{max}^2}{2} = \frac{mA^2\omega^2}{2} = \frac{0.4 \times 0.2 \times 5}{2} = 0.2$ J.
$E_P = E_{tot} - E_c = 0.2 - 0.128 = 0.072$ J ;

2.4.2 Exercices non résolus

1. Calculer la fréquence et la période :
   (a) de la trotteuse d'une montre.
   (b) d'un disque "33 tours" et "45" tours.
   (c) D'un moteur dont le compte tours indique "3000 tours/min".
   (Rép : Trotteuse = 0.017 Hz et 60 s, "33 tours" = 0.55 Hz et 1.82 s, "45 tours" = 0.75 Hz et 1.33 s, moteur = 50 Hz et 0.02 s).

2. Un mouvement harmonique est enregistré sur une feuille de papier qui défile à la vitesse de 30 cm/min. Le même élément de courbe se retrouve tous les 0.8 cm. Quelles sont la période et la fréquence de l'oscillateur ?
   (Rép : $T = 1.6$ s et $f = 0.625$ Hz).

3. Dessiner les fonctions suivantes :
   (a) $y = \sin t$
   (b) $y = 3\sin t$
   (c) $y = 2\sin\left(\frac{1}{2}t\right)$
   (d) $y = \frac{1}{2}\sin\left(\frac{1}{2}t + \frac{\pi}{3}\right)$
   (e) $y = 2\sin\left(3t - \frac{\pi}{6}\right)$

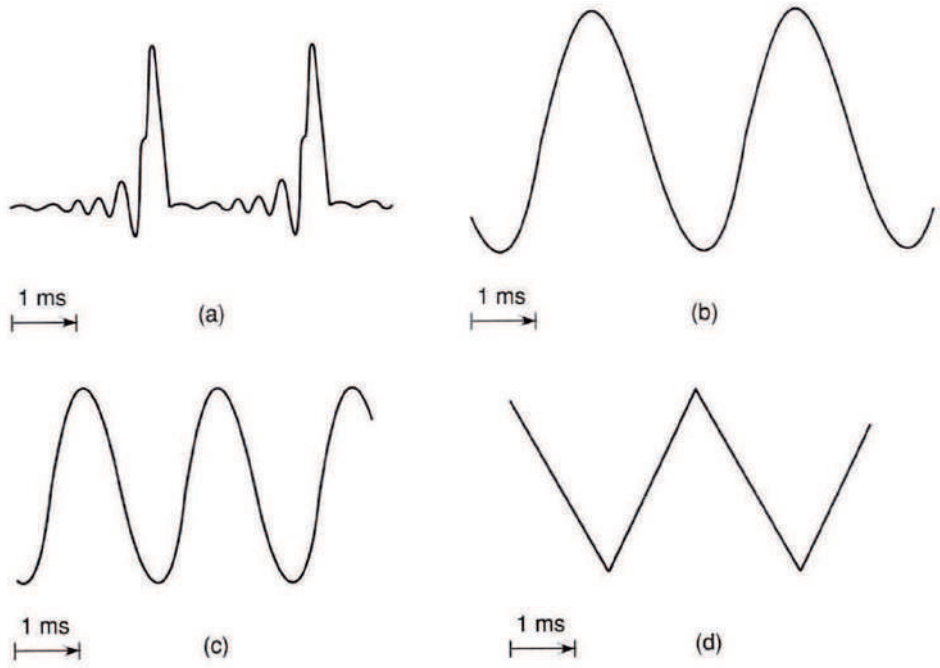


FIGURE 2.26 – Enregistrement de quatre phénomènes périodiques.

(f) $y = 0.8 \sin(0.4t - 2)$

4. Les figures 2.26 constituent les enregistrements de phénomènes périodiques.
   (a) Quels sont ceux qui correspondent à un mouvement harmonique ?
   (b) Calculer la période et la fréquence de chacun d'entre eux.

5. Même questions que pour l'exercice précédent. (Voir figure 2.27).

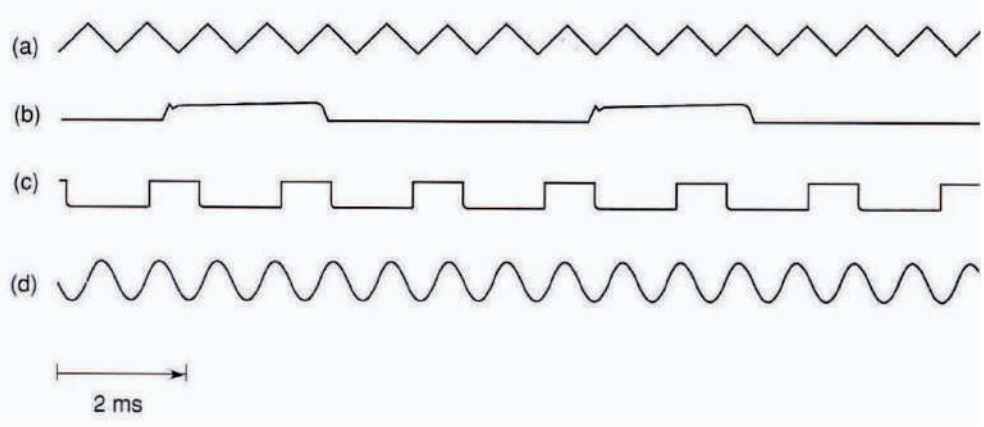


FIGURE 2.27 – Enregistrement de quatre autres phénomènes périodiques.

6. Pour les mouvements harmoniques représentés à la figure 2.28 :

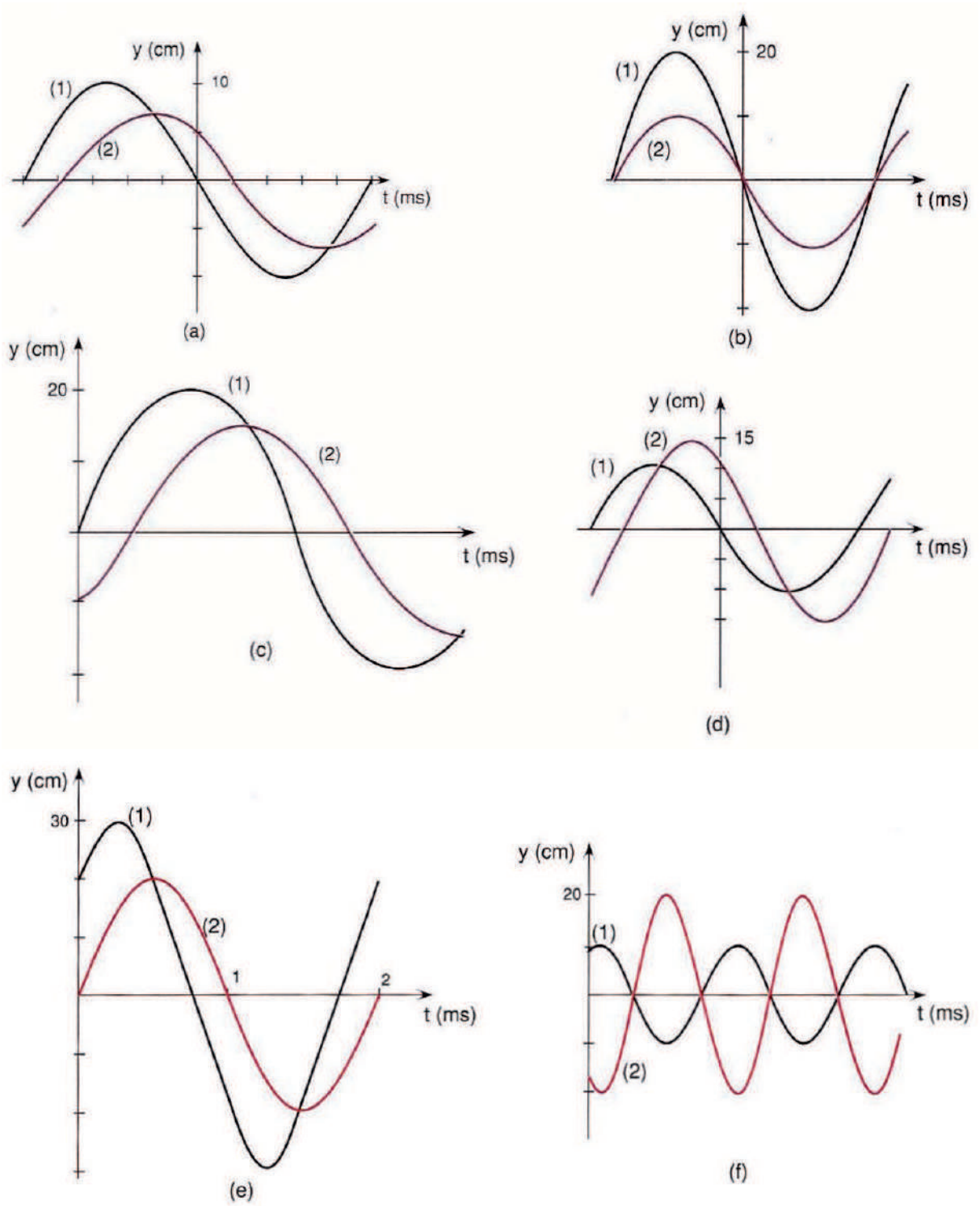


FIGURE 2.28 – Enregistrement de six mouvements harmoniques.

(a) Calculer le rapport des amplitudes et donner la valeur du déphasage en fraction de périodes.

(b) Indiquer ceux qui sont en concordance ou opposition de phase.

7. Soit le graphique $y = f(x)$ représenté à la figure 2.29 :

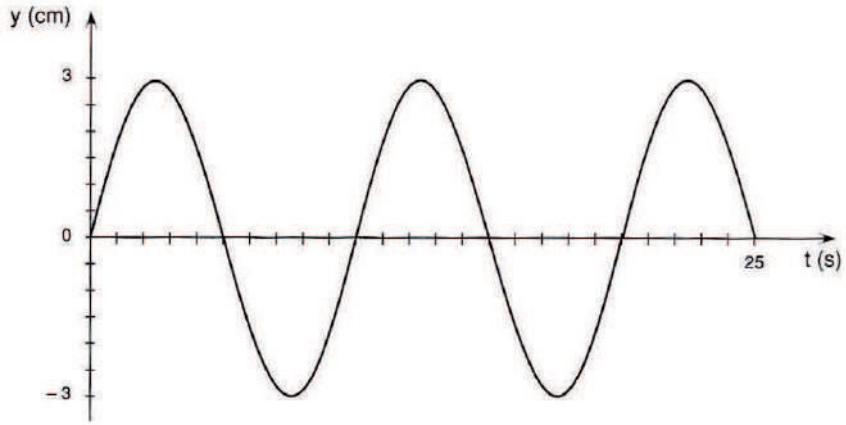


FIGURE 2.29 – Enregistrement d'un phénomène périodique.

(a) Déterminer amplitude, période et fréquence.

(b) Déterminer l'élongation aux instants $t = 1$ s ; 16 s ; 24 s.

(c) Construire le graphique d'un mouvement ayant l'amplitude moitié et fréquence moitié de celles du mouvement représenté.

(d) Construire le graphique d'un mouvement ayant une amplitude trois fois moindre, même période et en concordance de phase avec lui ;

(e) Construire le graphique ayant même amplitude, même fréquence, déphasé (en retard) de $T/4$ par rapport avec lui.

(Rép : (a) $A = 3$ cm ; $T = 10$ s ; $f = 0.1$ Hz. (b) 1.76 cm ; -1.76 cm ; 1.76 cm).

8. Ecrire l'équation d'un MVS d'amplitude 3 cm, de fréquence 20 Hz, et dont l'élongation est maximale à l'instant $t = 0$. Dessiner son vecteur de Fresnel.
(Rép : $y(t) = 0.03 \sin(40\pi t + \pi/2)$).

9. Un oscillateur harmonique a pour équation (y en cm et t en s) :

$$y(t) = 3 \sin\left(\frac{\pi}{4} t\right)$$

(a) Déterminer sa fréquence.

(b) Calculer sa vitesse à l'instant $t = 4$ s.

(c) Etablir l'équation d'un MVS d'amplitude double, de même période, et en retard d'un quart de période.

(Rép : $f = 0.125$ Hz, $v(4) = 2.36$ cm/s, $y(t) = 6\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2}\right)$).

10. Ecrire l'équation d'un MVS d'amplitude 5 cm, de période 0.20 s, et dont l'élongation est minimale à l'instant $t = 0$. Dessiner son vecteur de Fresnel.
(Rép : $y(t) = 0.05\sin(10\pi t - \pi/2)$ ou $y(t) = 0.05\sin(10\pi t + 3\pi/2)$.)

11. L'abscisse y d'un point animé d'un MVS est $y = 5\sin 6t$. (y en cm et t en s) Déterminer l'amplitude, la pulsation, la fréquence, la phase à l'origine et la période de ce MVS.
(Rép : 5 cm / 6 rad/s / 0.95 Hz / $\varphi = 0$ rad / 1.05 s).

12. Ecrire l'équation d'un MVS d'un mobile sachant qu'en $t = 0$, son élongation est maximale et égale à +10cm et que son accélération est de -40 cm/s^2.

13. Même question sachant que l'amplitude vaut 10 cm et qu'en $t = 0$, que se trouve son élongation $y = -5$ cm et qu'il va de haut en bas. La période $T = 2\pi$ seconde.

14. Un corps de 400g est en MVS avec une amplitude de 20 cm, une période de 2 s et $\varphi = 0$ Calculer la vitesse, l'accélération et la force de rappel sur ce corps en $y = 0$, $y = 20$ cm et $y = 5$ cm.
(Rép : 0.628 m/s / 0 m/s / 0.608 m/s / 0 m/s^2 / -1.97 m/s^2 / -0.49 m/s^2 / 0 N / -0.788 N / -0.196 N).

15. Etablir la période d'un pendule de 0.5 m de longueur.

16. La période d'un pendule est de 0.8 s. Quelle est sa longueur ?

17. Un pendule simple de 1.4 m de longueur effectue 8 oscillations complètes en 19 s. Que vaut le module de l'accélération gravitationnelle à l'endroit où se trouve le pendule ?
(Rép : $a = 9.80$m/s^2).

18. Si T_T est la période d'un pendule simple sur la terre, et T_L sa période sur la Lune, et sachant que $g_{Terre} = 6.g_{Lune}$, calculer le rapport T_T/T_L.
(Rép : $T_T/T_L = 0.41$).

19. La fréquence d'un oscillateur est de 30 Hz avec une amplitude de 3 cm. Si sa masse est de 40 g, quelle est son énergie ?

20. Lorsque deux adultes de masse totale 150 kg entrent dans une automobile de masse 1450 kg, l'automobile s'affaisse de 1 cm. (a) Quelle est la constante de rappel d'un des quatre ressorts de la suspension. (b) Quelle est la période des oscillations lorsque l'automobile chargée passe sur une bosse.
(Rép : (a) $k = 3.68 \times 10^4$ N/m. (b) $T = 0.655$ s).

21. La position d'un bloc attaché à un ressort est donné par $y = 0.2\sin(12t + 0.2)$, où y est en mètres et t en secondes. Trouvez (a) l'accélération quand $y = 0.08$ m ; (b) le premier instant (>0) auquel $y = +0.1$ m avec $v < 0$.
(Rép : (a) $a = -11.5\text{m/s}^2$, (b) $t = 0.201$ s).

22. Une masse de 2 kg est suspendue à un ressort de constante $k = 10$ N/S. A l'instant $t = 0$, on le lâche d'une position située à 10 cm au-dessus de sa position d'équilibre. Calculer la période, la fréquence et déterminer l'équation du mouvement. A l'instant $t = 2$ s, calculer sa position, sa vitesse, son accélération, son énergie cinétique, son énergie potentielle et son énergie totale.

23. Lorsque l'élongation d'un MVS vaut la moitié de l'amplitude, quelle est la valeur du rapport entre énergie cinétique et énergie totale ?
(Rép : $E_{cin} = \frac{3}{4}.E_{tot}$).

24. Soient les graphiques $y = f(x)$ représenté à la figure 2.30

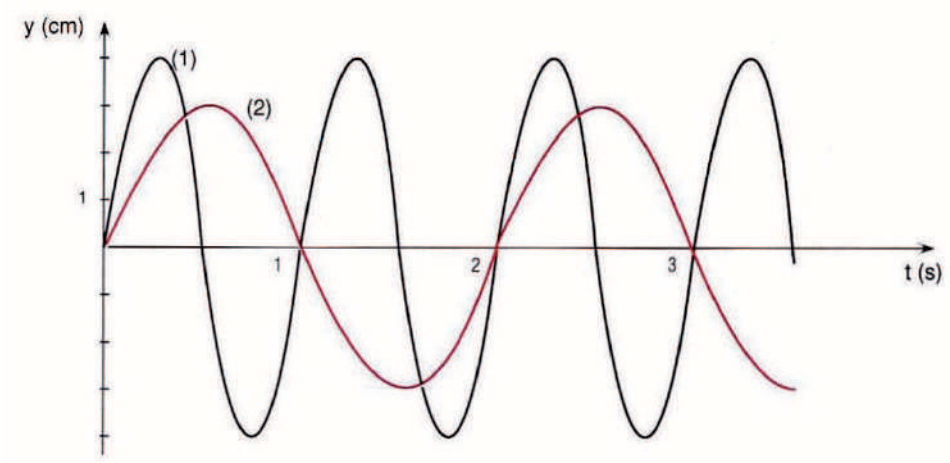


FIGURE 2.30 – Deux mouvements harmoniques.

(a) Etablir le rapport entre amplitudes, périodes et fréquences des mouvements de ces oscillateurs.
(b) A quels instants l'énergie cinétique de l'oscillateur (1) est elle maximale ?
(c) A quels instants l'énergie potentielle de (2) est-elle maximale ?

25. Soit le mouvement harmonique sans frottements d'une lame métallique enserrée dans un étau. (Voir figure 2.31). Indiquer la (les) position(s) où :
(a) l'énergie totale est uniquement potentielle ;
(b) l'énergie cinétique est maximum ;
(c) l'énergie totale est diminuée ;
(d) la somme de l'énergie cinétique et potentielle est inférieure à l'énergie totale ;

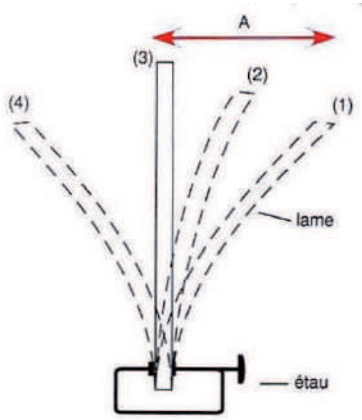


FIGURE 2.31 – Lame métallique enserrée dans un étau

(e) l'énergie cinétique et potentielle ont des valeurs non nulles.

(Rép : a) en (1) et en (4) ; b) en (3) : c) en aucune position ; d) en aucune position ; e) en (2))

26. Dans un système bloc-ressort, $m = 0.25$ kg et $k = 4$ N/m. A $t = 0.15$ s, la vitesse est $v = -0.175$ m/s et l'accélération $a = +0.877$ m/s^2. Ecrivez l'expression de la position en fonction du temps.
(Rép : $y(t) = 0.07 \sin(4t + 3.44)$.)

27. Un ressort vertical s'allonge de 0.16 m lorsqu'on y attache un bloc de masse $m = 0.5$ kg. On tire dessus pour lui donner un allongement supplémentaire de 0.08 m et on le lâche. (a) Ecrivez l'équation de la position $y(t)$ à partir de l'équilibre. (b) Trouvez le module de la vitesse et l'accélération lorsque l'allongement du ressort est égal à 0.1 m par rapport à sa position naturelle.
(Rép : (a) $y(t) = 0.08 \sin(7.83t + \pi/2)$. (b) $|v| = 0.415$ m/s et $a = +3.68$m/s^2.)

28. Un atome de masse 10^{-26} kg effectue une oscillation harmonique simple autour de sa position d'équilibre dans un cristal. La fréquence est égale à 10^{12} et l'amplitude à 0.05 nm. Trouvez (a) le module de la vitesse maximale ; (b) son énergie mécanique ; (c) le module de son accélération maximale ; (d) la constante de rappel correspondante.
(Rép : (a) 315 m/s ; (b) $E = 4.93 \times 10^{-23}$ J ; (c) 1.97×10^{15}m/s^2 ; (d) 0.395 N/m.)

29. L'équation d'un mouvement vibratoire est $y = A \sin(\omega t + \varphi)$. La longueur de la trajectoire vaut 8 cm, la période 4 s et à l'instant initial ($t = 0$), le mobile est a +4 cm de l'origine. Déterminer A, ω, φ.

30. Une masse de 500 g suspendue à un ressort est animé d'un mouvement de translation rectiligne sinusoïdal d'amplitude 10 cm et de période 0.5 s.

(a) Calculer sa vitesse :

i. lorsqu'elle passe par la position d'équilibre prise comme origine des élongations ;

ii. lorsqu'elle se trouve à l'une des extrémités de la trajectoire ;

iii. lorsqu'elle se trouve à 2 cm de l'origine.

(b) Calculer l'accélération en les trois positions précédentes.

(c) Calculer la force de rappel en les mêmes positions.

(d) Calculer l'énergie maximale de cette masse.

31. Un corps ponctuel est animé d'un mouvement vibratoire d'amplitude 5 cm et dont l'accélération est telle que $a = -16y$.

(a) Calculer la période et la fréquence du mouvement.

(b) Ecrire les expressions de l'élongation y et de la vitesse du point en fonction du temps.

(Rép : $T = 1.57$ s).

32. Une petite masse de 100 g est animée d'un mouvement de translation rectiligne sinusoïdal autour d'un point fixe O. Quand le mobile se trouve à 1 cm de O, la force de rappel a une intensité de 36×10^{-3} N. On prendra comme origine le point O et comme instant initial celui où le mobile est en O, animé d'une vitesse de 30 cm/s dans le sens adopté comme sens positif sur la trajectoire.

(a) Déterminer la période du mouvement ainsi produit.

(b) Ecrire les équations donnant la position, sa vitesse, son accélération et la force de rappel.

(c) Déterminer :

i. l'instant où le mobile passe pour la première fois par le point d'abscisse -3 cm, en se mouvant dans le sens négatif ;

ii. l'énergie cinétique et l'énergie potentielle que possède ce mobile à cet instant.

(Rép : 1.047 s ; $y = 0.05\sin(6t); v = 0.3\cos(6t)$; $a = -1.8\sin(6t)$; $f = -0.18\sin(6t)$; $t = 0.63$ s; $E_c = 288 \times 10^{-6}$ J; $E_p = 162 \times 10^{6}$ J).

33. Le piston d'un moteur à explosion dont l'arbre tourne à raison de 4500 tours/minute a une course de 8 cm. En admettant que son mouvement est sinusoïdal :

(a) écrire les équations de l'élongation, de la vitesse et de l'accélération de ce mobile en prenant pour origine et pour position initiale, le centre de symétrie du cylindre ;

(b) déterminer la valeur maximale de l'accélération de rappel, la comparer à l'accélération de la pesanteur et calculer la valeur maximale de la force de rappel, sachant que le piston a une masse de 100 g ;

(c) représenter les grandeurs sinusoïdales par leurs vecteurs de Fresnel. Echelle : 1 cm représente 10^{-2} pour l'élongation ; 4 m/s pour la vitesse et 2×10^2 m/s^2 pour l'accélération.

(Rép : $y = 0.04\sin(471t)$; $y = 18.84\sin(471t+\pi/2)$; $a = 8874\sin(471t+\pi)$; 887 N).

34. Deux pendules simples effectuent respectivement 50 et 30 oscillations par minute. Que vaut le rapport de leurs longueurs ?
(Rép : 0.36)

35. Lorsqu'un pendule assimilable à un pendule simple est écarté de sa position d'équilibre d'un angle de 12°, la force qui le ramène vers cette position est de 1 N. Que vaut cet angle d'écart lorsque la force de rappel est doublée ?
(Rép : 24°30').

36. Une masse m supposée ponctuelle est suspendue à un fil inextensible et sans poids de longueur $l = 2$ m.
    (a) Déterminer la période d'oscillation en un lieu où $g = 9.81$ m/s^2.
    (b) La masse m est écartée de sa position d'équilibre de manière que l'angle du fil avec la verticale 30°. Déterminer la vitesse de la masse au moment où elle repasse à la verticale du point de suspension.
    (c) Dans cette position, la masse se trouve à 2 m au-dessus du sol. Déterminer le point de chute de la masse sur le sol si le fil se rompt au moment du passage par la position considérée.

    (Rép : 2.8 s ; 2.3 m/s ; 1.46 m).

37. La période d'un pendule simple est de 2 secondes en un lieu où $g = 9.81$ m/s^2. Quelle est sa longueur ? Il est suspendu par un fil métallique de coefficient de dilatation linéaire $\lambda = 1.5 \times 10^{-5}$. De combien varie la période du pendule pour une élévation de température de 20°C. Avance-t-il ou retarde-t-il par rapport à un système oscillant rigoureusement invariable ? De combien par jour ?
(Rép : 99.4 cm ; 3×10^{-4} s ; 13 s).

38. Une horloge est réglée par un pendule en laiton battant la seconde à 0°C. De combien cette horloge avancera-t-elle ou retardera-t-elle par jour si la température atteint 20°C ? On considère que ce pendule est assimilable à un pendule simple de même période que lui (pendule simple synchrone). $\lambda = 1.85 \times 10^{-5}$.
(Rép : retard environ 16 s).

39. On réalise un pendule à l'aide d'une sphère de 1 kg suspendue à un fil fin. Déterminer la longueur de ce pendule assimilé à un pendule simple, sachant que sa période est de 2 secondes en un lieu où $g = 9.8$ m/s^2. L'angle d'écart maximal par rapport à la position d'équilibre est de 10°. Déterminer :
    (a) la vitesse linéaire du centre de la sphère au moment où elle passe par la position d'équilibre ;
    (b) la traction exercée à ce moment par le fil de suspension.

    (Rép : 99.4 cm ; 54.5 cm/s ; environ 20 N).

40. En un point s'ajoute deux MVS. Etablir l'équation du mouvement résultant.
    (a) $y_1 = \sin(\omega t + \pi/3)$ et $y_2 = \sin(\omega t - \pi/6)$
    (b) $y_1 = 2\sin(\omega t)$ et $y_2 = 5\sin(\omega t + \pi/2)$
    (c) $y_1 = 2\sin(\omega t - \pi/4)$ et $y_2 = 3\sin(\omega t + \pi/5)$

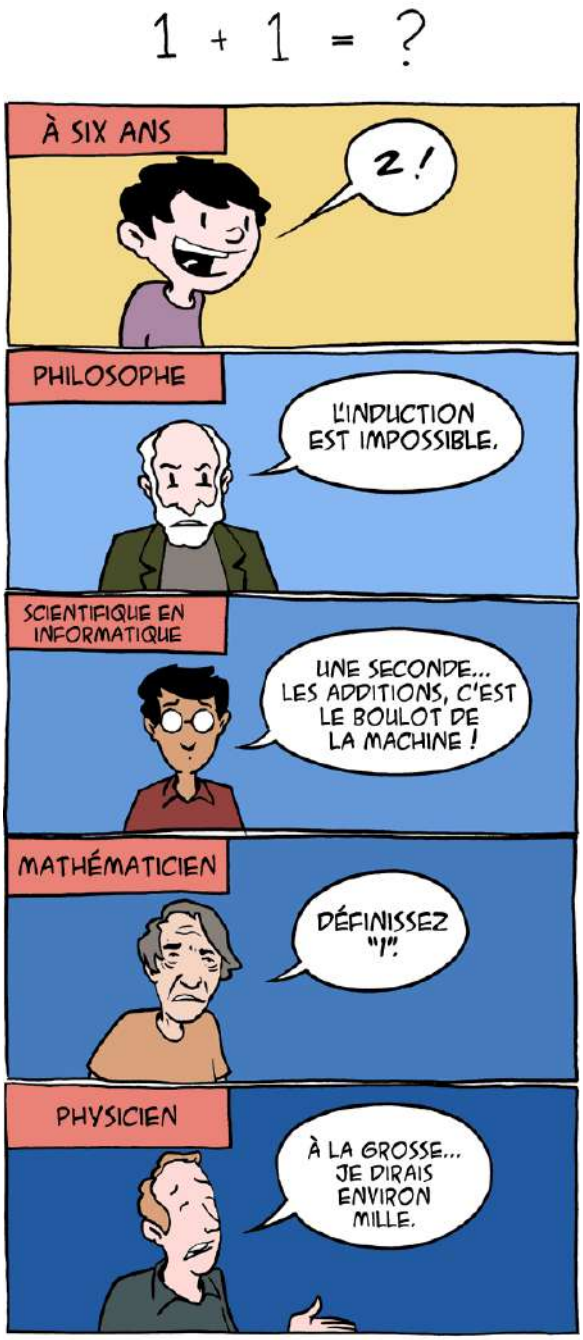
41. En un point s'ajoutent algébriquement 2 MVS. Etablir l'équation du mouvement résultant.
    (a) $y_1 = 8\sin\ 10\pi\ t$ et $y_2 = 6\ \sin(10\ \pi\, t + \pi/2)$
    (b) $y_1 = 15\ \sin(10\pi\ t)$ et $y_2 = 15\ \sin\ (10\pi\ t + 3\pi/2)$
    (c) $y_1 = 2\ \sin(\omega\ t - \pi/3)$ et $y_2 = 2\ \sin\ (\omega\ t + \pi/6)$

42. En un point s'ajoutent algébriquement 2 MVS. Etablir l'équation du mouvement résultant.

	y_1	y_2	Réponse
1	$y_1 = 5\sin(4\pi t)$	$y_2 = 6\sin(4\pi t + \pi)$	$y = \sin(4\pi t + \pi)$
2	$y_1 = 3\sin(4\pi t)$	$y_2 = 4\sin(4\pi t + \pi/2)$	$y = 5\sin(4\pi + 0.927)$
3	$y_1 = 4\sin(3\pi t)$	$y_2 = 2\sin(3\pi t - \pi)$	$y = 2\sin(3\pi t)$
4	$y_1 = 4\sin(4\pi t + 5\pi/4)$	$y_2 = 2\sin(4\pi t - 3\pi/4)$	$y = 3\sin(4\pi t + 5\pi/4)$
5	$y_1 = 3\sin(3\pi t)$	$y_2 = 3\sin(3\pi t - \pi/2)$	$y = 4.2\sin(3\pi - \pi/4)$
6	$y_1 = 4\sin(0.28t + 2\pi/5)$	$y_2 = 3\cos(0.28t + 2\pi/5)$	$y = 3.16\sin(4\pi t + 0.23\pi)$

43. En un point s'ajoutent algébriquement 2 MVS. Etablir l'équation du mouvement résultant.

	y_1	y_2	Réponse
1	$y_1 = 4\sin(0.28t + 2\pi/5)$	$y_2 = 3\cos(0.28t + 2\pi/5)$	$y = 5\sin(0.28t + 1.9)$
2	$y_1 = 4\sin(4t + \pi/2)$	$y_2 = 7\sin(4t + \pi 3/)$	$y = 8.4\sin(4t + 1.16)$
3	$y_1 = 4\sin(0.03t + 2\pi/5)$	$y_2 = 3\sin(0.03t + 2\pi/3)$	$y = 6.4\sin(0.03t + 1.61)$
4	$y_1 = 4\sin(40t + \pi/6)$	$y_2 = 6\sin(40t + 2\pi/3)$	$y = 7.2\sin(40t + 1.5)$
5	$y_1 = 3\sin(25t + \pi/2)$	$y_2 = 3\sin(25t + \pi)$	$y = 4.2\sin(25t + 3\pi/4)$
6	$y_1 = 4\sin(20\pi t - 5\pi/6)$	$y_2 = 3\sin(20\pi t - 4\pi/3)$	$y = 5\sin(20\pi t - 3.26)$


1 + 1 = ?
À SIX ANS
2 !
PHILOSOPHE
L'INDUCTION EST IMPOSSIBLE.
SCIENTIFIQUE EN INFORMATIQUE
UNE SECONDE... LES ADDITIONS, C'EST LE BOULOT DE LA MACHINE !
MATHÉMATICIEN
DÉFINISSEZ "1".
PHYSICIEN
À LA GROSSE... JE DIRAIS ENVIRON MILLE.

Chapitre 3

La résonance

Dans ce chapitre, nous allons voir comment l'énergie d'un oscillateur peut être transférée à un autre oscillateur.

3.1 Le pendule simple

Nous savons qu'un pendule écarté de sa position d'équilibre peut, si nous le lâchons, effectuer des oscillations libres avec une période propre (ou une fréquence propre) qui lui est caractéristique.

Les oscillations se poursuivent jusqu'au moment où l'énergie mécanique de départ aura complètement disparue, absorbée par le milieu extérieur au cours de l'amortissement.

Si nous désirons que les oscillations continuent, il faut que le système oscillant reçoive de l'énergie du monde extérieur et ce pour compenser l'amortissement. Nous parlerons d'oscillations entretenues. (Balançoire, cloche, ...)

Si nous désirons que les oscillations continuent, il faut que le système oscillant reçoive de l'énergie du monde extérieur et ce pour compenser l'amortissement. Nous parlerons d'oscillations entretenues. (Balançoire, cloche, ...)

3.2 Définitions

Imaginons un sonneur de cloche qui ture sur une corde pour mettre la cloche en mouvement.(Figure 3.1). Nous appellerons :

1. **résonateur** : le système qui reçoit de l'énergie (la cloche) ;
2. **excitateur** : le système qui fournit de l'énergie périodiquement (le sonneur de cloche).
3. **le couplage** : la liaison entre le résonateur et l'excitateur (la corde)

Nous allons voir que ce transfert d'énergie entre l'excitateur et le résonateur n'est maximum que dans le cas où une condition est réalisée : **la condition de synchronisation**.

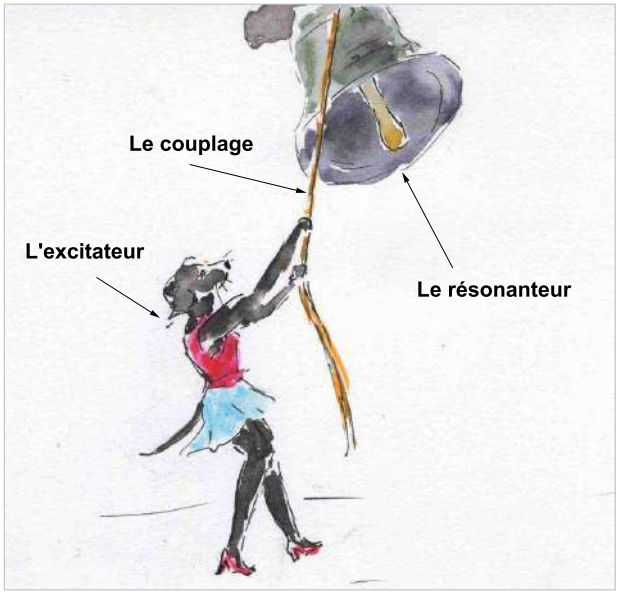


FIGURE 3.1 – Le sonneur de cloche.

3.3 Expérience

Prenons quatre pendules de longueurs L_1, L_2, L_3, L_4 donc de différentes fréquences propres. Suspendons-les à une corde rigide. Prenons un cinquième pendule de longueur L_5. (Voir figure 3.2)

Si on écarte le 5, il oscille. On constate alors que son amplitude diminue alors que le 3 se met à osciller graduellement. Les 1, 2, 4 restant pratiquement immobiles. Donc l'énergie du 5 (appelé l'excitateur) se transmet progressivement sur le 3 (appelé le résonateur) par l'intermédiaire de la corde (= couplage).

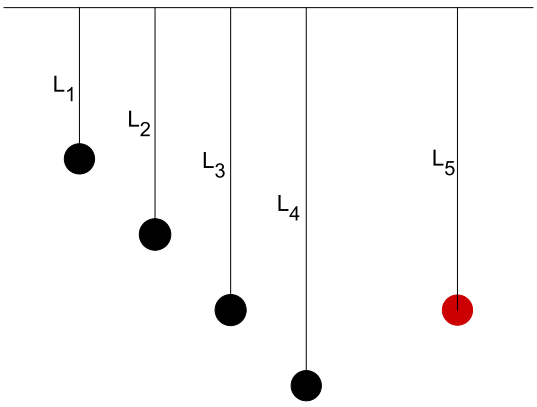


FIGURE 3.2 – Quatre pendules L_1, L_2, L_3, L_4 de longueurs différentes et donc de fréquences différentes et un pendule L_5 de longueur ajustable et donc de fréquence également ajustable.

Nous appellerons **résonance : le transfert maximum d'énergie entre deux systèmes**. L'énergie se transmet entre les systèmes qui ont la même fréquence propre d'oscillation ou de vibration. Entre les systèmes qui ont des fréquences propres différentes, il n'y pas ou peu de transfert d'énergie.

3.4 Conclusions

Il y a résonance lorsque la fréquence propre du résonateur est égale à la fréquence propre de l'excitateur. Le transfert d'énergie a donc un caractère sélectif : le résonateur absorbe l'énergie de façon préférentielle à sa fréquence propre.

3.5 Applications

1. Résonance acoustique : deux diapasons entre en résonance s'ils sont rigoureusement identiques. (Voir figure 3.3).

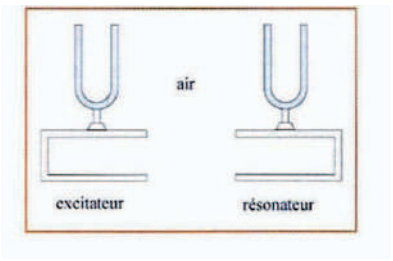


FIGURE 3.3 – Résonance acoustique : deux diapasons entre en résonance s'ils sont rigoureusement identiques.

2. Balançoire : Le pousseur (excitateur) communique à la balançoire (résonateur) des impulsions périodiques et ce avec une fréquence égale à celle des oscillations de la balançoire. Dans ces conditions de petites impulsions entraînent une grande amplitude progressive. (Voir figure 3.4).

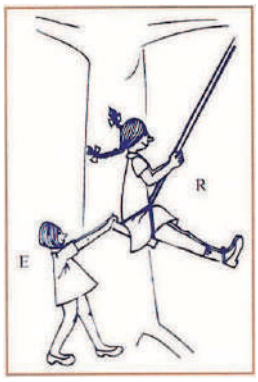


FIGURE 3.4 – Un enfant sur une balançoire doit régler le rythme de ses impulsions sur la fréquence propre de la balançoire s'il désire que l'amplitude devienne importante. Dans ce cas l'enfant (ou la personne derrière lui) est l'excitateur qui communique des impulsions périodiques au résonateur (système enfant-balançoire).

3. Masse d'eau dans un récipient : l'eau dans une baignoire a une fréquence propre d'oscillation Des mouvements périodiques de la main la font osciller et peuvent la faire déborder.
4. Pièces de voiture : rétroviseur, changement de vitesse, vitre, volant, ... peuvent vibrer lorsque la voiture a une vitesse déterminée : ce qui correspond à une vitesse de rotation du moteur bien déterminée.

5. Un verre en cristal émet un son si on le frotte à une certaine vitesse. Si on envoie un son avec une fréquence égale à celle du verre, il est possible que le verre éclate car il absorbe l'énergie acoustique qui lui est apportée à sa fréquence propre. (Voir figure 3.5).

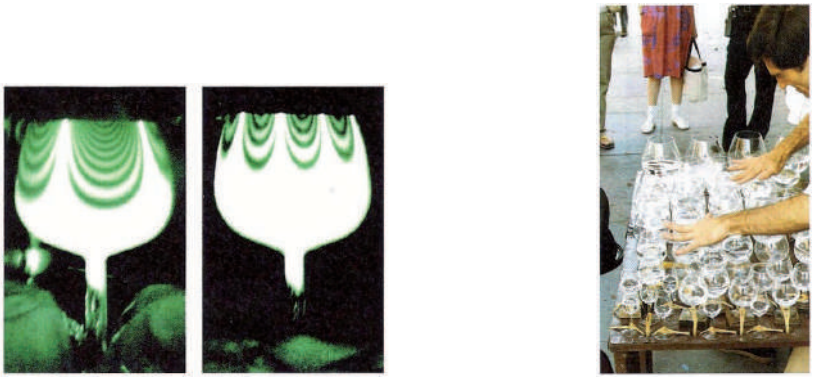


FIGURE 3.5 – (a) Un verre oscillant selon deux modes possibles. La région brillante de la photo est la partie du verre qui ne vibre pas. Les photos ont été prises à partir d'hologrammes interférométriques. (b) Un homme jouant un air dans une rue en faisant résonner des verres calibrés de différentes tailles. L'instrument appelé "Glass-harmonika" a été utilisé par Mozart.

6. On casse le pas en passant sur un pont pour ne pas avoir une fréquence particulière égale à celle du pont.
7. Les bateaux sont équilibrés pour que leur fréquence propre soit supérieure à celle de la houle.
8. Une voiture montée sur ressorts peut entrer en résonance avec les bosses de la route. Pour l'éviter, on lui met des amortisseurs. (Voir figure 3.6).

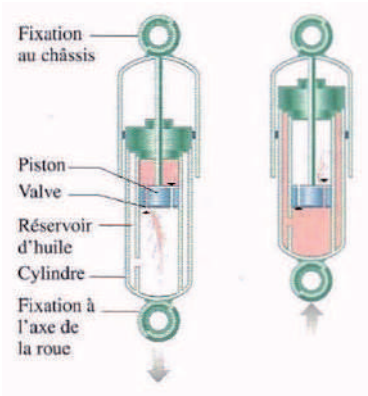


FIGURE 3.6 – L'amortisseur d'une voiture a un frottement visqueux ; la force est proportionnelle à la vitesse du piston, qui peut être produite quand la voiture passe dans une fondrière, se heurte à une grand force d'amortissement. Par contre un mouvement lent et progressif du piston ne rencontre qu'un faible résistance.

9. Nous savons que les séismes correspondent à des vibrations brutales du sol qui se propagent ; - à partir du foyer, la déformation se propage sous forme d'ondes sismiques ; ce sont ces ondes qui en arrivant en surface sont responsables des dégâts. Ce qui est frappant, lors d'un séisme destructeur, ce sont les bâtiments pratiquement "intacts" qui côtoient ceux totalement détruits. Chaque bâtiment a une fréquence de vibration propre. Si cette fréquence correspond à celle des vibrations sismiques, le bâtiment entrera en résonance et sera détruit. (Voir figure 3.7).

FIGURE 3.7 – Un séisme a provoqué l'effondrement d'un autoroute à deux niveaux. Cette partie de l'autoroute est construite sur un sol sédimentaire, qui transmet les vibrations proches de 2 Hz, fréquence naturelle de l'autoroute. Celle-ci a alors été le siège de violentes résonnances.

10. Le premier pont franchissant le détroit de Tacoma avait un tablier principal de 853 m de longueur et de 11,9 m de largeur avec des poutres métalliques de 2.4 m pour le soutenir. Le matin du 7 novembre 1940, un vent de 70 km/h l'a fait fait vibrer. (Voir figure 3.8). L'amplitude est devenue si grande que le pont s'est effondrer. Bien qu'il y ait encore des questions restées sans réponse, le mécanisme fondamental qui a causé la catastrophe semble avoir été la formation de tourbillons. (Voir figure 3.9).

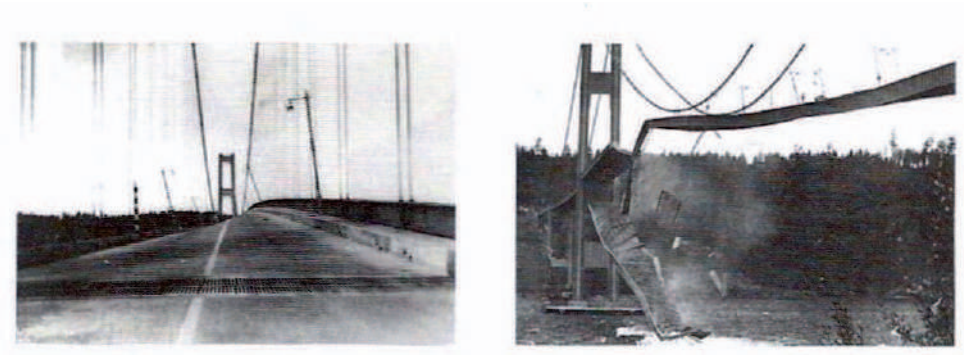


FIGURE 3.8 – (Oscillations du pont juste avant qu'il ne se brise et rupture du pont. Une voiture fut prise au piège. Le professeur Farquharson, qui étudiait le pont, alla jusqu'à la voiture pour sauver le chien qui était dans la voiture mais celui-ci refusa de sortir.

Exemple Certains ponts ont des grilles d'acier visibles et incrustées dans la route. De même, certains virages d'autoroute sont barrés de sillons pour améliorer l'adhérence sur route mouillés. Sachant qu'un voiture a des pneus de 60 cm et que les sillons de la route sont distants de 8.0 cm, à quelle vitesse un véhicule, roulant sur une telle surface, entre en résonance, si la fréquence propre de son système de suspension est de 15.0 Hz ?

Solution Il y a $1/0.080 = 12.5$ sillons par mètres. Ainsi, à la vitesse v (en m/s), la voiture se déplace sur $12.5v$ sillons par seconde, qui est la fréquence d'excitation. Il y a résonance si : $12.5v = 15.05$ Hz, d'où $v = 1.2$ m/s soit 4.3 km/h. Cette vitesse ne dépend pas du diamètre des roues. C'est pourquoi le véhicule subit des secousses à faibles vitesses sur ce genre de route.

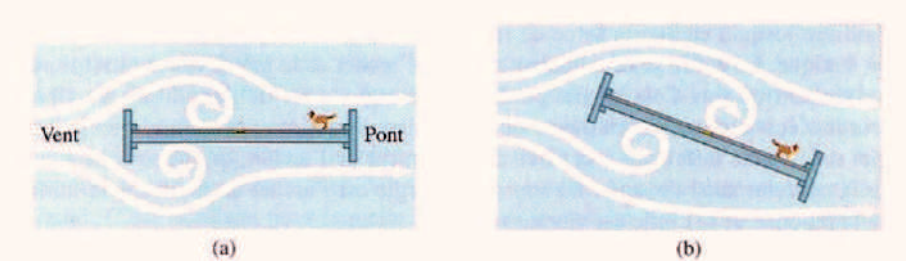


FIGURE 3.9 – (Représentations de la section droite du pont de Tacoma (a) Le tablier principal est mis en vibration par les tourbillons alternés. (b) En oscillant, le tablier induit d'autres tourbillons qui amènent le pont à la fréquence de résonance. Ces tourbillons induits par le mouvement se sont accordés avec le tablier oscillant, augmentant l'amplitude des vibrations.

Chapitre 4

Généralités sur les ondes

4.1 Introduction

Un caillou ou une goutte tombant à la surface de l'eau produit une déformation à l'endroit de l'impact et on observe la formation d'une ride circulaire qui se propage à la surface de l'eau autour de ce point. (Voir figure 4.1).

Un cri ou une explosion produit de minuscules déplacements des particules d'air accompagnés de faibles modifications de pression (onde acoustique). (Voir figure 4.2).

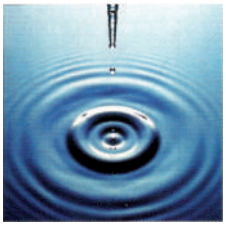


FIGURE 4.1 – Une série de gouttelettes tombant verticalement dans de l'eau produit une onde périodique qui se répand radialement sur la surface à partir de la source, et forme des cercles concentriques

FIGURE 4.2 – Un cri génère une onde acoustique.

A l'extrémité d'un ressort, ou d'une corde, nous pouvons provoquer une perturbation (à l'aide de la main) qui se propage le long de celui-ci. (Voir figure 4.3).

Une vague qui se propage à la surface de l'eau n'est rien d'autre qu'une déformation qui se déplace mais chaque particule d'eau ne subit qu'un faible déplacement. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer le mouvement d'un bouchon déposé à la surface de l'eau : lorsque la vague passe, le bouchon effectue un mouvement de haut en bas, mais après le passage de la déformation, il reste localisé au même endroit. (Voir figure 4.4).

4.2 Définition d'une onde

Pour chaque exemple cité, une propriété physique (la position, la pression,....) du milieu a été modifiée localement et temporairement. La perturbation se propage de proche

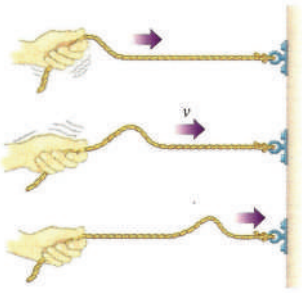


FIGURE 4.3 – Une impulsion ondulatoire se propageant le long d'une corde tendue.

FIGURE 4.4 – Un surfeur sur une vague. Si le surfeur avance, l'eau elle reste pratiquement sur place.

en proche à travers un milieu élastique capable de se déformer, c'est-à-dire capable d'emmagasiner et de restituer de l'énergie. Chaque point va reproduire la perturbation émise à l'origine.

Tous ces exemples montrent que lors de la formation d'une onde, il y a transfert d'énergie de proche en proche dans un milieu sans qu'il y ait transport de matière. Le milieu s'agite momentanément mais ne se déplace pas.

Nous appellerons **onde progressive, un transfert d'énergie sans transport de matière grâce à la propagation de proche en proche d'un signal (aussi appelé perturbation) à travers un milieu élastique**.

Nous distinguerons deux types d'ondes. ce sont :

- **Les ondes mécaniques** : qui ont besoin d'un support matériel. Une illustration simple est le son : une onde sonore (un bruit) est un déplacement d'énergie, dans l'air ambiant par exemple.
- **Les ondes électromagnétiques** : qui n'ont pas besoin de support matériel pour se propager. Ce sont les ondes radio, TV, la lumière, etc.

Dans les premiers chapitres de ce cours, nous traiterons uniquement les ondes mécaniques. Dans les deux derniers chapitres, nous aborderons les ondes électromagnétiques.

4.3 Classification des ondes

Trois qualificatifs peuvent être utilisés pour classer une onde mécanique : La direction, le milieu de propagation, la nature du mouvement.

4.3.1 La direction

Il s'agit de la direction du mouvement des particules de la matière par rapport à la direction de propagation de l'onde.

Onde transversale

L'onde est dite transversale lorsque la déformation est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. (Voir figure 4.5). Exemples :

1. onde produite par un objet à la surface de l'eau ;

2. onde produite sur une corde tendue ;
3. la lumière (onde électro-magnétique).

Onde longitudinale

L'onde est dite longitudinale lorsque la déformation est parallèle à la direction de propagation de l'onde. (Voir figure 4.6). Exemples :

1. onde produite sur un ressort ;
2. ondes sonores : dans la direction de propagation, la matière se déplace d'avant en arrière.

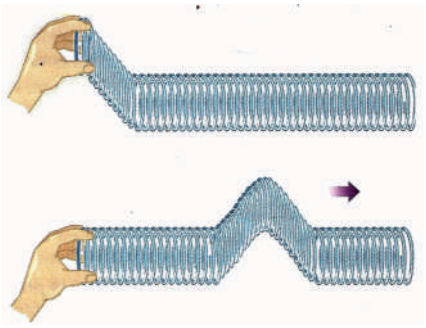


FIGURE 4.5 – Une onde transversale dans un ressort.

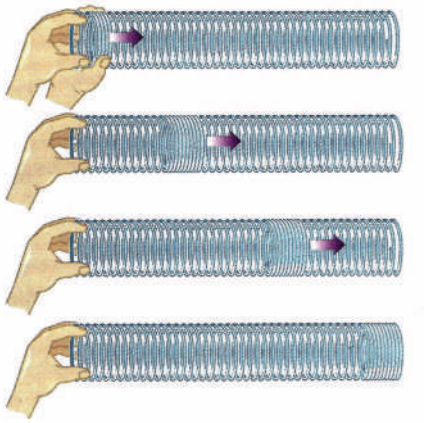


FIGURE 4.6 – Une onde longitudinale dans un ressort.

4.3.2 Le milieu de propagation

1. onde à une dimension : la corde, le ressort ;
2. onde à deux dimensions : la surface de l'eau, la membrane élastique d'un tambour ;
3. onde à trois dimensions : les ondes sonores.

4.3.3 La nature du mouvement

1. une impulsion : la perturbation est de très courte durée ;
2. un train d'ondes : la déformation est complexe, mais de nature finie dans le temps ;
3. une onde périodique : la déformation est une fonction périodique, de type sinus ou cosinus par exemple, de durée qui tend vers l'infini.

Dans la suite de ce cours, nous parlerons essentiellement des ondes périodiques. (Voir figure 4.7).

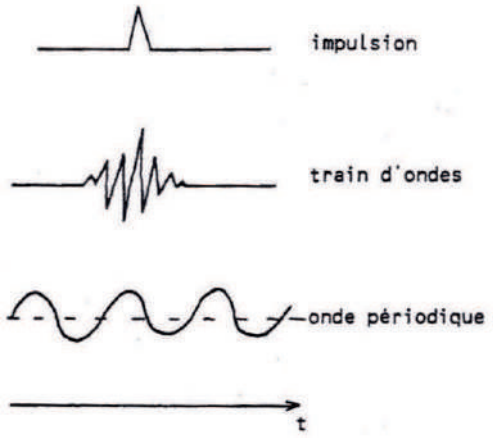


FIGURE 4.7 – Exemple d'une impulsion, d'un train d'ondes et d'une onde périodique

4.4 Vitesse d'une onde

L'expérience montre que la vitesse V avec laquelle la perturbation se propage à une valeur finie. Cette vitesse :

1. dépend des caractéristiques du milieu.
   Exemples : La vitesse des ondes sonores (Voir aussi figure 4.8).
   (a) 331 m/s à 0°C dans l'air
   (b) 340 m/s à 15°C dans l'air
   (c) 1500 m/s à 15°C dans l'eau
   (d) 3570 m/s dans la fonte

FIGURE 4.8 – Vitesse du son dans différents milieux. La vitesse est nettement plus élevée dans les liquides et encore beaucoup plus élevée dans les solides. La vitesse dépend principalement de la densité et de la rigidité du milieu. Notez la vitesse particulièrement élevée dans le diamant qui est une structure cristalline très rigide.

	milieu	v [m/s]
gaz	air (0°C)	331
	air (20°C)	343
	He	972
liquides	eau	1493
	Hg	1450
solides	diamant	12000
	verre	5640
	or	3240

2. dépend de la nature du signal.
   Exemples :
   (a) les ondes acoustiques dans l'air 340 m/s à 15°C ;
   (b) les ondes radio et lumineuses dans l'air 3.10^8 m/s.
3. ne dépend pas de l'amplitude du signal initial.

4.5 Longueur d'onde

Dans tout ce qui suit, nous supposerons que la perturbation initiale est du type sinusoïdal. Nous pouvons imaginer des photographies de la corde aux instants : $t = 0$, $T/4$, $T/2$, $3T/4$, T, où T est la période de la perturbation (ou de l'oscillateur de la source). Appelons v, la vitesse de la perturbation dans la corde.

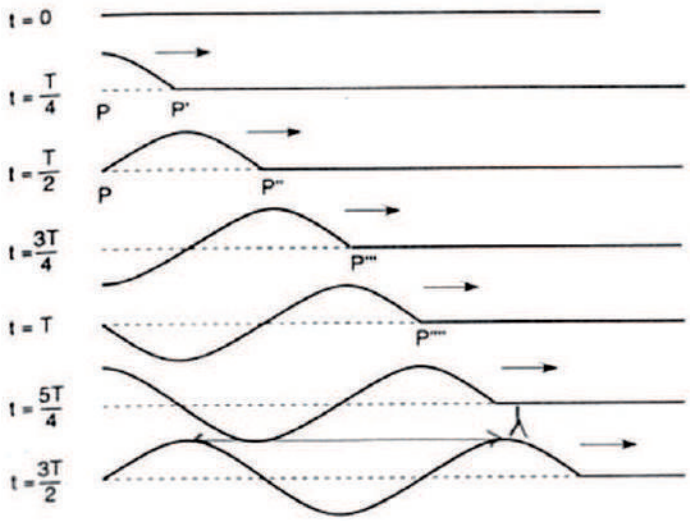


FIGURE 4.9 – Progression d'une perturbation sinusoïdale le long d'une corde tendue.

A l'instant, $t = 0$ la corde est immobile et le point P commence à osciller.
A l'instant $t = \frac{T}{4}$, le point P est à son élongation maximale et la perturbation produite en P se trouve en P'. La perturbation a parcouru une distance $d_1 = \frac{vT}{4}$.
A l'instant $t = \frac{T}{2}$, l'élongation du point est nulle, la perturbation produite initialement en P se trouve en P'' et elle a parcouru une distance $d_2 = \frac{vT}{2}$.
A l'instant $t = \frac{3T}{4}$; l'élongation du point P est minimale, la perturbation initiale se trouve en P''' et la distance parcourue par la perturbation est $d_3 = \frac{3vT}{4}$.
A l'instant $t = T$, l'élongation du point est à nouveau nulle, la perturbation initiale a parcouru $d = vT$; et ainsi de suite pour d'autres instants $t = \frac{5T}{4}, \frac{3T}{2}$, etc.

Nous appellerons **longueur d'onde** λ (se dit lambda) d'une onde, la distance parcourue par l'onde pendant une période T. (Voir figure 4.10).

$$\boxed{\lambda = v.T = \frac{v}{f}} \tag{4.1}$$

La longueur d'onde se mesure en mètre, v en m/s et f en Hz.
Nous noterons que λ dépend :

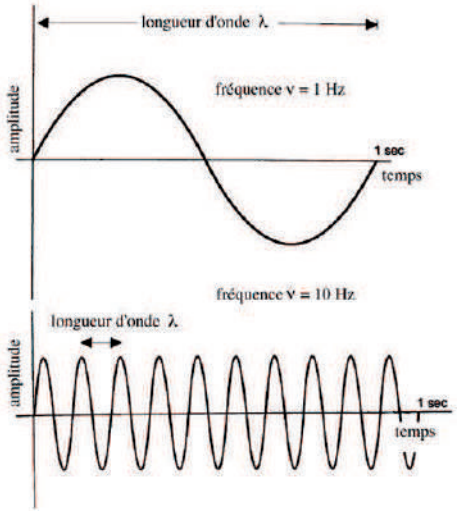


FIGURE 4.10 – Pour une vitesse donnée, la fréquence et la longueur d'onde sont inversement proportionnelles. Si la fréquence est multipliée par 10, la longueur d'onde est divisée par 10.

1. de la source par la fréquence f d'oscillation de celle-ci ;
2. du milieu par la vitesse v de propagation.

4.6 Double périodicité

4.6.1 Périodicité dans le temps

Si nous regardons l'évolution des points d'une corde soumise à une perturbation transversale d'une main, nous nous rendons compte qu'un point de la corde monte et descend au même rythme que la main. Ce rythme est donné par la période T du mouvement. Chaque point oscille et revient dans le même état vibratoire après un temps égal à une période T. (Voir figure 4.11)

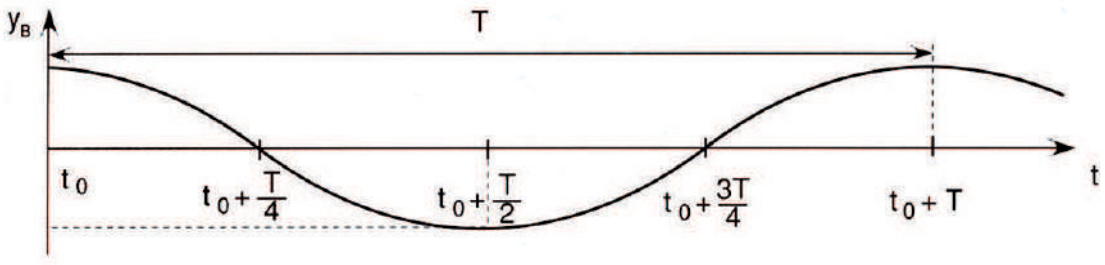


FIGURE 4.11 – Périodicité dans le temps. Si nous nous plaçons en un point déterminé, nous voyons ce point osciller avec une période T.

4.6.2 Périodicité dans l'espace

Si nous faisons une photographie de la corde, nous nous apercevons que certains points sont dans le même état vibratoire (les creux, les sommets, etc). La figure 4.12 nous montre que ces points sont séparés par une longueur d'onde. La longueur d'onde d'une onde représente la distance minimale séparant deux points qui sont dans le même état vibratoire. Donc deux sommets ou deux creux d'une onde sont séparés par λ. On dit que ces points sont en phase (ou en concordance de phase).

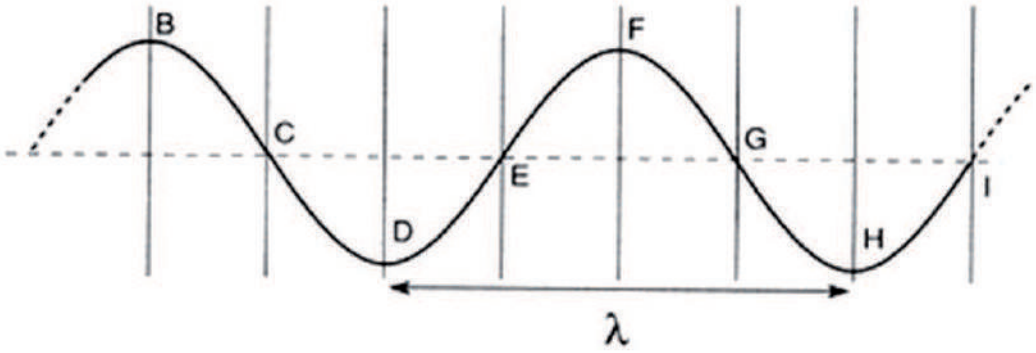


FIGURE 4.12 – Périodicité dans l'espace. A un instant précis, nous prenons une photo de la corde. La distance minimale qui sépare deux points en concordance de phase est la longueur d'onde.

4.7 Equation de propagation

4.7.1 Introduction

Considérons une onde unidimensionnelle, qui ne change pas de forme en se propageant le long de l'axe des x. Il peut s'agir d'une impulsion ondulatoire, d'un train d'ondes ou d'une onde périodique sans fin. La pratique habituelle est de représenter mathématiquement une onde par une **fonction d'onde** (symbolisée généralement par la lettre grec psi : ψ), qui est une *certaine* fonction de l'espace et du temps : $\psi = f(x,t)$. Pour l'instant, ne nous occupons pas de cette fonction, elle est juste quelque chose qui dépend à la fois de l'espace et du temps. Nous pouvons figer la fonction d'onde à un moment donné, disons $t = 0$, en remplaçant t par zéro dans $\psi(x,t)$ pour toute valeur de x. Ceci rend ψ indépendant du temps :

$$\psi(x,t) \mid_{t=0} = f(x,0) = f(x)$$

Cette fonction de la seule variable x est l'expression mathématique de la forme (ou du motif ou du profil) de l'onde à l'instant $t = 0$. Par exemple, la figure 4.13 représente une impulsion particulière, à l'instant $t = 0$, et dont l'équation est : $\psi(x,0) = f(x) = \frac{3}{10x^2+1}$. S'il s'agissait d'une onde sur une corde, ψ peut représenter le déplacement vertical et nous pourrions alors remplacer ψ par y. La fonction $f(x)$ peut être n'importe qu'elle fonction régulière pour autant quelle soit deux fois différentiables.

Maintenant, transformons $f(x)$ en $\psi(x,t)$, c'est-à-dire en une fonction décrivant une onde qui se déplace dans la sens des x positifs à la vitesse v. Il suffit de remarquer que

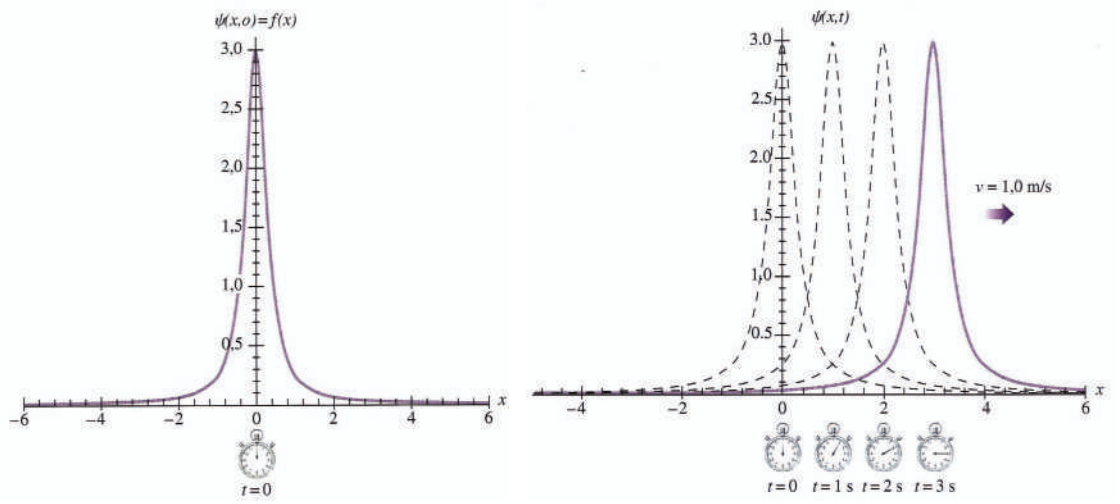


FIGURE 4.13 – (a) Profil d'une impulsion ondulatoire donné par la fonction $\psi(x,0) = f(x) = \frac{3}{10x^2+1}$. (b) Le profil se déplace vers la droite comme une onde. Il a une vitesse de 1 m/s et se propage le long de l'axe x.

pendant le temps t l'onde s'est déplacée d'une longueur vt. Puisque que nous avons supposé que l'onde ne se déforme pas en se propageant, la forme de l'onde est la même à l'instant $t = 0$ et à l'instant $t = t$. Par conséquent, il suffit de remplacer dans la fonction, x par $(x - vt)$, pour avoir $\psi(x,t)$ et donc :

$$\boxed{\psi(x,t) = f(x - vt)}$$

Ce qu'on appelle précisément **vitesse de l'onde** (v), c'est la vitesse avec laquelle on progresse, et nous avons :

$$\boxed{v = f\lambda = \frac{\lambda}{T}} \tag{4.2}$$

Exemple Un jeune garçon contemple, d'un bateau, les vagues sur un lac ; elles semblent être une succession sans fin de crêtes identiques qui passent l'une après l'autre à une demi-seconde d'intervalle. Si elles mettent 1.5 s pour parcourir sa coque de longueur 4.5 m, déterminez la fréquence, la période et la longueur d'onde de ces vagues.

Solution

1. Le temps séparant deux crêtes successives est la période, donc : $T = 0.5$ s.
2. La fréquence est donc : $f = 1/t = 1/0.5 = 2,0$ Hz.
3. La vitesse est : $v = L/t = 4.5/1.5 = 3.0$ m/s.
4. Nous en déduisons la longueur d'onde : $\lambda = v/f = 1.5$ m.

4.7.2 Les ondes sinusoïdales progressives

Supposons que la fonction $f(x)$ ne soit pas n'importe quelle fonction mais une fonction sinusoïdale $y = A\sin(kx)$. Pour transformer cette fonction y en une fonction d'onde progressive ψ , nous avons vu qu'il suffit de faire le changement de variable $x \Rightarrow x - vt$. Nous obtenons :

$$y = A\sin k\,(x - vt) = A\sin(kx - kvt)$$

Cependant, nous savons qu'une fonction sinusoïdale est une fonction périodique semblable à elle-même tous les 2π. Autrement dit chaque fois que :

$$kvt = 2\pi \rightarrow t = \frac{2\pi}{kv}$$

Et ce temps t est précisément la période du mouvement. Nous pouvons donc écrire :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{kv} \quad \text{mais} \quad \omega = 2\pi f \rightarrow \omega = kv$$

Ce qui donne les relations importantes suivantes 4.3 :

$$\boxed{v = \lambda f = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}} \quad \text{et} \quad \boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}} \tag{4.3}$$

k s'appelle le **nombre d'onde** (à ne pas confondre avec le k de la loi de Hooke) L'équation de l'onde sinusoïdale progressive, dite aussi **onde harmonique progressive**, peut se représenter par les équations suivantes :

$$\boxed{\begin{aligned} y &= A\sin k\,(x - vt) \\ y &= A\sin \frac{2\pi}{\lambda}\,(x - vt) \\ y &= A\sin\,(kx - \omega t) \end{aligned}} \tag{4.4}$$

Ces trois écritures sont équivalentes. Ces équations représentent une onde progressive qui se déplace dans le sens des x **positifs**.

Commentaires

1. A est l'amplitude qui est toujours positive même si y peut être négatif.
2. L'argument $kx - \omega t$ est la **phase** φ qui s'exprime en radians. La phase est le nombre de radians de l'origine jusqu'au point x. Le profil se répète avec une période d'espace égale à la longueur d'onde λ, donc $y = 0$ pour $x = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, etc.$ (Voir figure 4.14).
3. Tous les points distants de la source S d'une distance x, ont la même équation. Donc tous ces points vibrent de la même manière. Ils constituent une surface d'onde.
   (a) Si les surfaces d'onde sont des sphères ⇒ onde sphérique.
   (b) Si les surfaces d'onde sont des plans ⇒ onde plane ;
4. Dans une même direction de propagation tous les points distants
   (a) d'une longueur d'onde vibrent de la même manière : on dit qu'ils sont en concordance de phase phase, ou simplement en phase ;

(b) d'une demi-longueur d'onde vibrent en opposition de phase.

5. Nous avons montré que l'énergie d'un oscillateur est proportionnelle au carré de l'amplitude. (Voir Equation 2.7). Or l'onde est précisément générée par un oscillateur (la source). Une onde permet de transférer l'énergie émise par la source à un point donné. Comme la source, l'onde oscille entre $-A$ et $+A$. En conclusion, **l'énergie associée à une onde est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde**. Cela est vrai pour toutes les ondes. Le carré de l'amplitude d'une onde sonore détermine son intensité sonore et le carré de l'amplitude d'une onde lumineuse détermine d'intensité lumineuse.

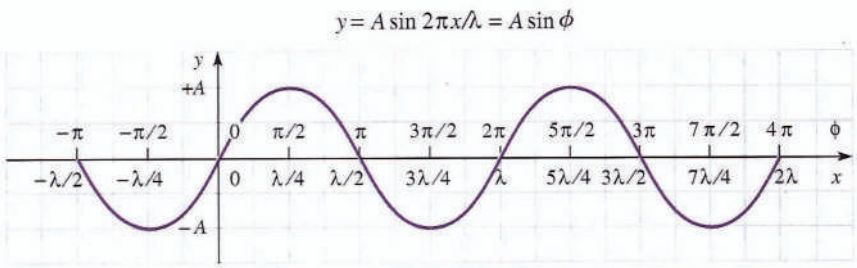


FIGURE 4.14 – Fonction sinusoïdale comme profil d'une onde sinusoïdale. Une longueur d'onde λ correspond à un changement de phase φ de 2π rad.

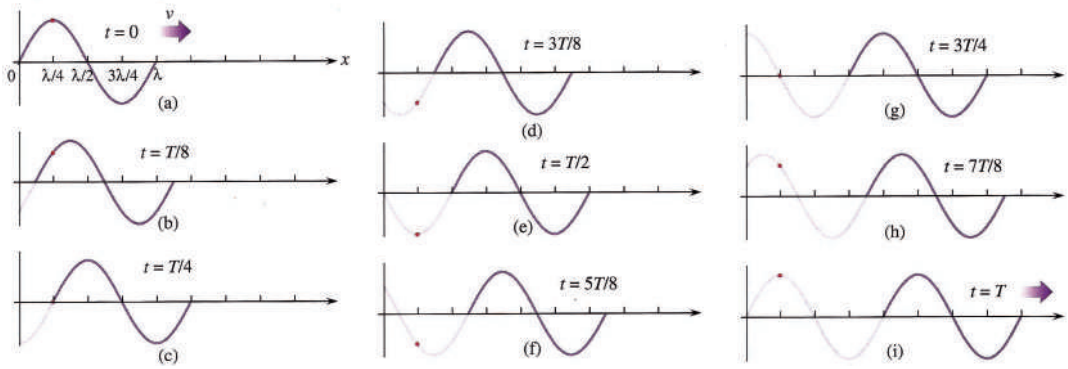


FIGURE 4.15 – Propagation d'une onde sinusoïdale le long de l'axe des x pendant une période. Noter que tout point de la corde ne se déplace que verticalement.

Exemple Un homme se tient debout à l'entrée d'un port et voit des vagues d'eau entrer dans le port. Il assimile ces vagues à des mouvements sinusoïdaux. Il compte 50 crêtes en 1,0 min et il estime que la distance entre deux crêtes est de 3,0 m. Ecrire une expression de la forme de la hauteur des vagues à l'endroit ou l'homme se tient. Quels sont la longueur d'onde, le nombre d'onde, la fréquence, la pulsation, la vitesse des vagues et l'équation des vagues ?

Solution Soit $+x$ pris dans la direction de l'entrée du port et h la hauteur des vagues au-dessus du niveau moyen de l'eau. Une expression pour h est : $h(x,t) = h_0 \sin(kx - \omega t)$.

L'amplitude, ou hauteur maximale h_0 n'est pas spécifiée, mais nous pouvons déterminer les autres grandeurs.
Le nombre d'onde est : $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{3.0} = 2.1\ \text{m}^{-1}$.
La fréquence est de 50 crêtes par minute : $f = \frac{50}{60} = 0.83\ \text{s}^{-1}$.
La pulsation est donc : $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 0.83 = 5.2$ rad/s.
La vitesse est donnée par : $v = \lambda f = 3.02 \times 0.83 = 2.5$ m/s.
L'équation des vagues est finalement : $h(x,t) = h_0 \sin(2.1x - 5.2t)$.

IMPORTANT : Les équations ci-dessus, supposent que $y = 0$ en $x = 0$ et à $t = 0$. Ce ne sera pas le cas en général. Il faudra alors introduire une constante de phase φ. Nous obtenons :

$$\boxed{\begin{array}{l} y = A\sin\left(k\left(x \pm vt\right) + \varphi\right) \\ y = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(x \pm vt\right) + \varphi\right) \\ y = A\sin\left(kx \pm \omega t + \varphi\right) \end{array}} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \text{Signe } - \text{ si déplacement vers le sens des } x > 0 \\ \text{Signe } + \text{ si déplacement vers le sens des } x < 0 \end{array}$$

Exemple Soit une onde d'équation : $y\left(x,t\right) = 0.05\sin\left[\frac{\pi}{2}\left(10x - 40t\right) - \frac{\pi}{4}\right]$ où x et y sont en mètres et t en secondes. Trouver : a) la longueur d'onde, la fréquence et la vitesse de propagation de l'onde ; b) la vitesse et l'accélération d'une particule située sur le chemin de l'onde à $x = 0.5$ m et $t = 0.0$ s.

Solution

1. L'équation peut s'écrire : $y\left(x,t\right) = 0.05\sin\left(5\pi x - 20\pi t - \frac{\pi}{4}\right)$. En comparant avec la forme canonique de l'équation, nous déduisons $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 5\pi \rightarrow \lambda = 0.4$ m. La fréquence angulaire est $\omega = 2\pi f = 20\pi \rightarrow f = 10$ Hz . La vitesse de propagation de l'onde est $v = f\lambda = \frac{\omega}{k} = 4$ m/s dans le sens des x positifs.
2. Pour obtenir la vitesse et l'accélération de la particule, nous allons dériver par rapport au temps (c'est-à-dire que l'on considère x comme constant) :

$$v = y'\left(x = cst, t\right) = -20\pi \times 0.05 \times \cos\left(\frac{5\pi}{2} - \pi - \frac{\pi}{4}\right) = 2.22\ \text{m/s}$$
$$a = y''\left(x = cst, t\right) = -\left(20\pi^2\right) \times 0.05 \times \sin\left(\frac{5\pi}{2} - \pi - \frac{\pi}{4}\right) = 140\ /\text{s}^2$$

Exemple Soit l'onde transversale décrite à la figure 4.16. Sa vitesse de propagation est de 40 cm/s vers la droite. Déterminez : 1) la fréquence ; 2) la différence de phase en radians entre des points distants de 2.5 cm ; 3) le temps nécessaire pour que la phase en un point donné varie de 60° ; 4) la vitesse d'une particule au point P à l'instant représenté.

Solution L'onde transversale, de forme sinusoïdale, se propage à $v = 40$ cm/s vers la droite. L'analyse de la figure permet d'obtenir les autres données nécessaires.

1. Comme $\lambda = 4$ cm, nous obtenons : $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{0.4}{0.04} = 10$ Hz.

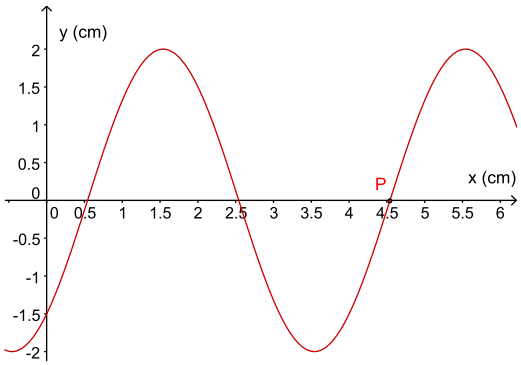


FIGURE 4.16 – Une onde transversale à un moment t.

2. La phase à une position quelconque de l'onde est fixée par $2\pi\frac{x}{\lambda}$. Si la distance est deux points est $\Delta x = 2.5$ cm, la variation de phase entre ces deux points est donnée par : $\Delta\varphi = 2\pi\frac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi \times \frac{2.5\times10^{-2}}{4\times10^{-2}} = 3.93$ rad.
3. La phase à un instant quelconque est fixée par $2\pi\frac{t}{T}$ et la période de l'onde est $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{10} = 0.1$ s. En un point donné, si la variation de phase est de

$$\Delta\varphi = 60° \times \frac{2\pi \text{ rad}}{360°} = 1.047 \text{ rad}$$

, le temps écoulé est $\Delta\varphi = 2\pi\frac{\Delta t}{T} \rightarrow \Delta t = \frac{T\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{0.10\times1.047}{2\pi} = 0.0167$ s
4. Chaque particule de la corde subit un mouvement harmonique simple. Nous savons que, lorsque la position d'une particule est nulle, la vitesse est maximale et vaut $v = \pm\omega.A$. (Il suffit de dériver y en fonction de t, x étant constant. On obtient un cosinus dont les extrémums valent +/-1). Comme l'onde se déplace vers la droite, P se déplace vers le bas à l'instant représenté, et, la vitesse est donc négative. Donc : $v = -\omega A = -\frac{2\pi}{T}A = -\frac{2\pi}{0.10} \times 2 \times 10^{-2} = -1.26$ m/s.

4.8 Complément pour information - L'équation d'onde

Reprenons l'équation des ondes harmoniques et prenons deux fois les dérivées partielles par rapport à x et y.

Pour rappel, une dérivée partielle implique que toutes les autres variables sont considérées comme des constantes. Nous utiliserons la notation traditionnelle : $\frac{\partial f}{\partial x}$. De même : $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$ est la dérivée partielle seconde.
Nous écrivons :

$$y = A\sin(kx - \omega t)$$

Par rapport à x	Par rapport à t
$\frac{\partial y}{\partial x} = Ak\cos(kx-\omega t)$	$\frac{\partial y}{\partial t} = -A\omega\cos(kx-\omega t)$
$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -Ak^2\sin(kx-\omega t) = -k^2 y$	$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -A\omega^2\sin(kx-\omega t) = -\omega^2 y$

Autrement dit :

$$-y = \frac{1}{k^2}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{\omega^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{k^2}{\omega^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Et comme $\frac{k}{\omega} = \frac{1}{v}$

$$\boxed{\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}$$

Cette équation est l'équation d'onde. C'est une des équations les plus importantes de la physique. Si on parvient à décrire un phénomène par cette équation, on peut alors énoncer que le phénomène est décrit par une onde progressive.

Par exemple, Maxwell en partant des seules considérations des lois d'Ampère, de Coulomb, et de Faraday, arrive à la conclusion qu'une onde électromagnétique progressant dans la direction des x peut être décrite par les équations du type de celle-ci :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

où :

- E_y composante selon y du champ électrique.
- ϵ_0 permittivité du vide $= 8.85 \times 10^{-12}$ C^2/N.m^2.
- μ_0 perméabilité du vide $= 4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A.

Ce qui démontre que les ondes électromagnétiques sont des ondes sinusoïdales progressives qui se déplacent à la vitesse :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s } = \text{la vitesse de la lumière}$$

A titre d'exercice, le lecteur vérifiera que $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$ a bien les dimensions d'une vitesse.

4.9 Exercices

1. Citer deux observations de la vie courante montrant que la vitesse de la lumière est beaucoup plus élevée que celle du son.

2. Lorsqu'une goutte tombe à la surface d'un liquide tranquille, on voit apparaître des ondes circulaires. La vitesse de propagation de ces ondes dépend-elle :
   (a) de la hauteur de la chute ;
   (b) de la grosseur de la goutte ;
   (c) de la nature du liquide dans le récipient.
   Justifier vos réponses.

3. Parmi les accessoires utilisés en gymnastique rythmique et sportive, on utilise le ruban. Les déformations qui s'y propagent sont-elles de type transversal ou longitudinal ? Justifier la réponse.

4. Les rides qui se forment à la surface d'un drapeau agité par le vent sont-elles des déformations transversales ou longitudinales ? Justifier la réponse.

5. Une onde se propage à la vitesse de 40 m/s. Sa fréquence est de 50 Hz. Quelle est sa longueur d'onde ?
(Rép : 0,8 m).

6. Une onde a une longueur d'onde de 1,2m et sa vitesse de propagation est de 96 m/s. Quelle est sa fréquence ? (Rép : 80 Hz).

7. Des oscillations transversales partent d'un point O et se propagent avec une vitesse de 3 m/s. L'amplitude des ondes est de 10 cm et la période est de 1/4 s. Déterminer la longueur d'onde. Après combien de temps un point situé à 120 cm de la source commence-t-il son oscillation ?
(Rép : 0,75 m / 0,4 s).

8. La fréquence de l'onde sonore associée à la voix humaine est de l'ordre de 500 Hz. Pour cette fréquence, déterminer la longueur d'onde de l'onde sonore dans l'air. Comparer cette longueur d'onde à celle d'une onde émise par une radio locale dont on connaît la fréquence d'émission (Radio 21 : 90.8 MHz).
(Rép : 0,68 m / 3,3 m).

9. Un mouvement ondulatoire fait 6m en 20s. Sachant que deux sommets de l'onde sont séparés de 40 cm, calculer la fréquence de l'onde. Ecrire l'équation d'un point M situé à 1,8 m de la source.
(Rép : 0,3m/s, $\lambda = 0.4$ m, $y = A \sin 5\pi(1.8 - 0.3t)$).

10. Un MVS d'amplitude 9 cm se propage à la vitesse de 4 m/s et a une longueur d'onde de 50 cm. En $t = 0$, le mouvement est en $y = 0$
    (a) Calculer f et T.
    (b) Exprimer l'élongation d'un point situé à une distance d de la source.
    (c) Calculer l'élongation d'un point M situé à 5 m de la source après 6 s et 6,2 s.
    (d) Calculer en radians la différence de phase entre les points M et M' situé à 4,7 m de la source.

    (Rép : 8Hz, 125 ms, 0 cm, 5,29 cm, 1.2π).

11. La figure 4.17 représente, à un instant donné, une brève déformation transversale qui se déplace vers la droite le long d'un long ressort. Parmi les points numérotés de 1 à 7, quels sont ceux qui sont en train de monter et de descendre à cet instant ?

12. Un point S est animé d'un mouvement sinusoïdal de 2 cm d'amplitude et de fréquence 100 Hz. Ce vibrations se propagent dans le milieu environnant avec une vitesse de 10 m/s.
    (a) Déterminer la longueur d'onde ;
    (b) Exprimer l'équation du mouvement de S ;

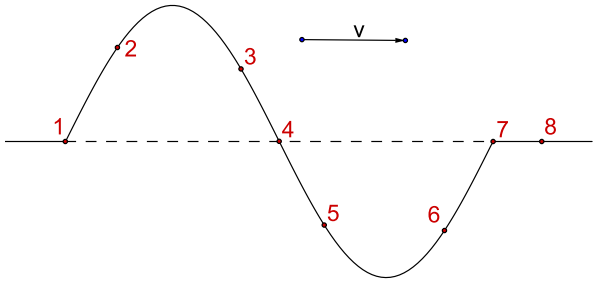


FIGURE 4.17 – Onde se déplaçant le long d'un tuyau en caoutchouc.

(c) Exprimer l'équation du mouvement d'un point M situé à 25 cm de S.

(Rép : $\lambda = 10$ cm).

13. Un vibreur produit des ondes de 2 cm d'amplitude de 50 Hz de fréquence. Elles se propagent à la vitesse de 250 cm/s.
    (a) Ecrire l'équation de propagation de la source si la phase à l'origine est nulle.
    (b) Calculer la longueur d'onde.
    (c) Calculer l'élongation à l'instant $t = 1,5$ s d'un point situé à 25 cm de la source.
    (d) Calculer la différence de phase entre deux points distants de 12,5 cm.

    (Rép : $y = -0.02\sin(100\pi t)$ / $\lambda = 0,05$ m / 0 / π).

14. Une onde sinusoïdale se propage le long d'une corde élastique.
    (a) Dessiner la corde à un instant t_0 quelconque.
    (b) Dessiner la corde à l'instant $t_0 + 3T/8$.

15. Une onde a une longueur d'onde de 1.20 m et sa vitesse de propagation est de 96 m/s Quelle est la fréquence de la source ?
    (Rép : 80 Hz).

16. Un mouvement vibratoire de fréquence de 20 Hz se propage avec une vitesse de 2 m/s. Déterminer la distance entre les différents points qui vibrent continuellement en opposition de phase. Comment varie cette distance si l'on double la fréquence ?

17. Des oscillations transversales partent du point O et se propagent avec une vitesse de 3 m/s. l'amplitude des ondes est de 10 cm et la période est de 0.25 s.
    (a) Déterminer la longueur d'onde.
    (b) Après combien de temps une particule P située à 120 cm de O commence-t-elle son oscillation ?
    (c) Ecrire l'équation de l'élongation du point O si la constante de phase est nulle.

(d) Ecrire l'équation de l'élongation du point P.

(Rép : $\lambda = 0.75$ m ; 0.4 s ; $y_0(t) = 10\sin(8\pi t)$ (en mm) ; $y_p(t) = 10\sin(8\pi t - 3.2\pi)$).

18. Une onde progressive se propage le long d'une corde très longue. Deux points P et P' de cette corde oscillent en opposition de phase. Ils sont séparés de 12 cm. Déterminer la longueur d'onde si aucun autre point compris entre P et P' n'oscille en opposition de phase entre eux. Déterminer le déphasage entre P et un point P'' distant de 6 cm de P.
(Rép : 0.24 m).

19. L'élongation d'un vibreur est donnée par l'équation suivante $y(t) = 0.04\sin(213.52t)$ en sachant que l'élongation s'exprime en mètre et le temps en seconde. Déterminer la longueur d'onde si la vitesse de propagation est 1.7 m/s.
(Rép : 0.05 m).

20. Un vibreur produit des ondes sinusoïdales entretenues de 2 cm d'amplitude et de 50 Hz de fréquence. Ces ondes se propagent à une vitesse de 250 cm/s .
    (a) Ecrire l'équation de l'élongation de la source si la constante de phase est nulle.
    (b) Calculer la longueur d'onde.
    (c) Déterminer la valeur de l'élongation à l'instant $t = 1.5$ s d'un point distant de 25 cm de la source.
    (d) Etablir la différence de phase entre deux points distants de 12.5 cm

    (Rép : $Y_S(t) = 0.02\sin(100\pi t)$; $\lambda = 0.05$ m ; 0 ; π).

21. Une onde se déplace à la vitesse $v = 3$ m/s vers la droite le long d'un tuyau de caoutchouc. Le dessin suivant représente le tuyau photographié à un instant t_0. (Voir figure 4.18).

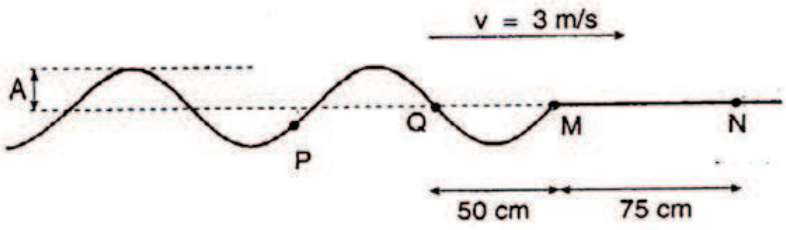


FIGURE 4.18 – Onde se déplaçant le long d'un tuyau en caoutchouc.

    (a) Le point P est-il en train de monter ou de descendre ?
    (b) Déterminer la longueur d'onde.
    (c) Quelle sera l'élongation du point Q à l'instant $t_0 + T/4$?
    (d) Quelle est la fréquence de l'onde ?
    (e) Sachant que la distance MN vaut 0.75 m, dans combien de temps le point N aura-t-il pour la première fois une élongation maximale ?

(f) Représenter deux points du tuyau qui sont chacun en opposition de phase avec le point Q.

Justifier clairement chacune des réponses.
(Rép : Descendre, $\lambda = 1$ m ; $y_P(t) = A$; 3 Hz ; 0.33 s).

22. Une vibration transversale part d'un point O et se propage avec une vitesse de 3 m/s. Son amplitude vaut 10 cm et sa fréquence 1/4 Hz. Si on compte les durées à partir de l'instant où la particule située en O commence à vibre :
    (a) Que vaut la longueur d'onde ?
    (b) Après combien de secondes une particule située à 120 cm de O commencera-t-elle à vibrer ?
    (c) Que vaudra l'élongation de cette particule après 50 s ?

23. Un mouvement vibratoire de fréquence 20 Hz se propage avec une vitesse de 2 m/s. Déterminer la distance entre les différents points qui vibrent continuellement en opposition de phase. Comment varie cette distance si l'on double la fréquence ?

24. Une vibration transversale d'amplitude 5 cm se propage avec la vitesse de 2 m/s. La longueur d'onde vaut 30 cm. On a pris comme origine des durées, l'instant où la particule qui se trouve à l'origine des distances a commencé son mouvement.
    (a) Calculer la fréquence et la période du mouvement vibratoire qui se propage.
    (b) Ecrire la relation exprimant l'élongation d'un point situé à une distance x au-delà du point d'origine O.
    (c) Calculer l'élongation du point x_1 situé à 3 m du point O, après 4 s et après 4 s 1/3.
    (d) Calculer en degrés, la différence des phases correspondant au point x_1 et au point x_2 situé à 3.2 m du point origine.

25. Une vibration sinusoïdale de période 0.6 s se propage avec une vitesse de 20 m/s. Que vaut l'angle de déphasage entre les mouvements de deux points distants respectivement de 8 et 14 m de la source ?
    (Rép : π).

26. Lors des tremblements de terre, deux types d'ondes sismiques se propagent dans la croûte terrestre. Les ondes P (primaires) progressent à 5.6 km/s, les ondes S (secondaires) à 3.6 km/s. Lors d'une étude sismologique, trois stations S_1, S_2 et S_3, positionnée selon le plan de la figure 4.19, détectent les ondes produites lors d'un même séisme. Les heures d'arrivée sont consiqnées dans la figure 4.19. A quelle heure et à quel endroit le tremblement de terre a-t-il eu lieu ? (On suppose qu'il s'est déroulé à la surface de la Terre).
    (Rép : le séisme a eu lieu à 15 h 29 min 48 s et à 58.5 km de S_1, 82.7 km de S_2 et 29.2 km de S_3.

Station	Instant de détection	
	Ondes P	Ondes S
S_1	15 h 29 min 58,9 s	15 h 30 min 4,7 s
S_2	15 h 30 min 2,6 s	15 h 30 min 10,8 s
S_3	15 h 29 min 54,5 s	15 h 29 min 57,4 s

FIGURE 4.19 – Heures d'arrivée des ondes

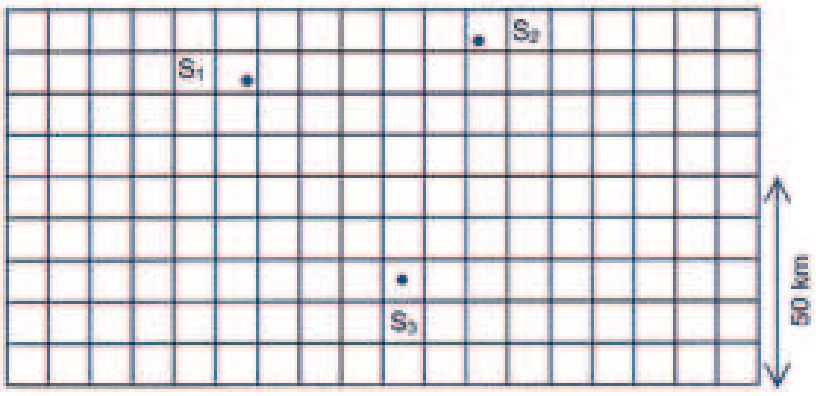


FIGURE 4.20 – Plan de situation des stations

Chapitre 5

Acoustique

5.1 L'acoustique

L'acoustique est la science du son, ce qui inclut sa production, son contrôle, sa transmission, sa réception et ses effets. Elle fait notamment appel à des notions de mécanique des fluides, de mécanique vibratoire et de thermodynamique.

Le terme acoustique fut introduit par Joseph Sauveur (1653-1716) : il est construit à partir du terme $\alpha\kappa o\sigma\tau\iota\kappa o\varsigma$ [akoustikos] provenant du grec ancien signifiant « de l'ouïe » , lui-même provenant de $\alpha\kappa o\upsilon\epsilon\iota\nu$ [akouein], signifiant « entendre ».

L'acoustique comprend de nombreuses ramifications parmi lesquelles on rencontre l'électroacoustique (microphones, haut-parleurs), l'audition, l'acoustique musicale, etc.

L'acoustique a des applications dans les domaines des sciences de la terre et de l'atmosphère, des sciences de l'ingénieur, des sciences de la vie et de la santé, ainsi que dans les sciences humaines et sociales.

5.2 Les ondes acoustiques

5.2.1 Production des ondes sonores

Les objets qui produisent des ondes sonores s'appellent des *sources sonores*.

Expériences

- Diapason + billes de frigolite avec et sans son. Frappons un branche de diapason à l'aide d'un petit marteau. Nous percevons immédiatement un son. Si nous plaçons, contre l'une des branches, une petite bille de frigolite, nous constatons qu'elle vivement repoussée. Touchons maintenant le diapason avec la main, nous avons immédiatement conscience d'arrêter un phénomène vibratoire. Le son émis cessent immédiatement.
- Dans le cas d'un piano, c'est la corde métallique qui devient source de son dès qu'elle est animée d'un mouvement vibratoire produit par le choc d'un petit marteau. De même, le frottement de l'archet sur une corde de violon provoque des vibrations mécaniques et il en résulte un son.

- Si nous frappons légèrement un vase ou une verre de cristal, il en résulte un son : comme dans le cas précédent, vibrations et son cessent si nous touchons le vase.
- Haut parleur en fonctionnement et des billes de frigolite avec et sans son.
- Latte tendue au bord d'une table.
- Flûte de musicien.

Les constations précédentes nous permettent d'affirmer que **tout corps qui produit un son est animé d'un mouvement vibratoire.** Nous dirons qu'il est une **source sonore**.

Exemples de sources sonores

- La voix (cordes vocales), cordes de guitare, violon ;
- Membrane d'un haut-parleur, tambour ;
- Cloche, verre de cristal ;
- Instrument à vent.

Nature de l'onde sonore

Le son ne se propage pas dans le vide.

1. Plaçons une sonnerie électrique sur un coussinet sous la cloche d'une machine pneumatique et faisons le vide dans la cloche au moyen d'une pompe. Le son s'affaiblit progressivement à mesure que se produit la réréfraction de l'air ; après un certain temps, nous voyons encore le marteau qui frappe le cocle, mais nous ne percevons plus le son.

2. Entourons de feuilles d'ouate ou de feutre, un diapason qui vibre ; le son nous parvient très affaibli.

3. Lorsque nous nageons sou l'eau, nous savons, par expérience que nous percevons encore les sons.

4. En son émis en gratant l'extrémité d'une longue table est parfaitement audible si l'on place l'oreille à l'autre extrémité

Conclusions

1. **Un miieu matériel élastique est indispensable à la propagation du son.**

2. **Le son se propage d'autant moins bien que l'elasticité du milieu est moins bonne.**

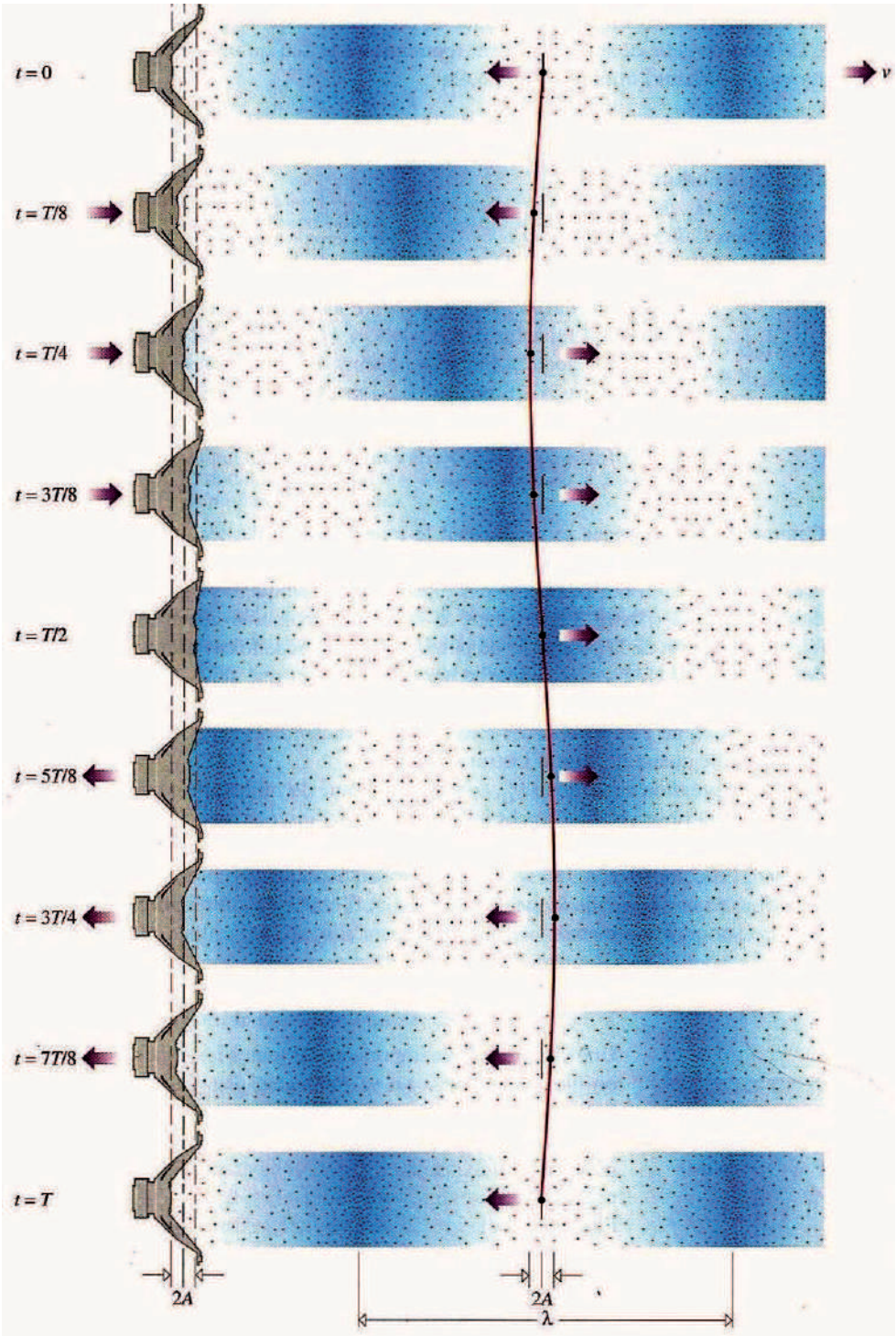


FIGURE 5.1 – Onde sonore engendrée par un haut-parleur. Noter que le cône du haut-parleur balaie une distance totale égale à $2A$. Chaque atome d'air oscille aussi sur une segment de longueur $2A$. Comparer cette distance à la longueur d'onde λ.

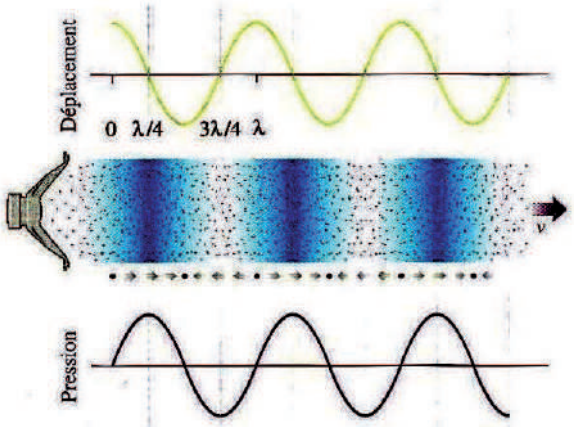


FIGURE 5.2 – Un haut parleur produit des compressions et des raréfactions dans l'air d'un tube. Les déplacements longitudinaux (à un instant particulier) sont représentés par les flèches et sont tracés sur le graphe du haut. Les fluctuations de pression au-dessus et en dessous de la pression atmosphérique sont tracés sur le graphe du bas. On remarque qu'un point de déplacement nul correspond à un variation maximale de la pression et vice-versa.

Transmission du son.

A l'état d'équilibre, la pression et la densité d'un fluide sont uniformes. Pourtant les molécules du fluide ne sont pas au repos ; elles sont animées de mouvements aléatoires et subissent de fréquentes collisions. En présence d'une onde sonore, chaque petit élément de volume de gaz est soumis à des vibrations *longitudinales* périodiques. ce mouvement ordonné des éléments se superpose au mouvement aléatoire des molécules. Les déplacements des éléments de volume donnent naissance à des fluctuations périodiques de la densité du fluide et donc de la pression. Un son très intense correspond à une pression acoustique inférieure à environ 10 Pa (10^{-5} atm) et une musique douce à correspond à 0.002 Pa. Pour rappel, 1 atm = 10^5 Pa. On voit donc que les variations de pression dues à une onde sonore sont très faibles par rapport à la pression atmosphérique.

5.2.2 Conclusions

Le mot "son" a deux significations. Il y a d'abord le concept physiologique et psychologique du son : ce qu'entend l'oreille humaine, c'est-à-dire le détecteur formé par l'oreille couplée au cerveau. D'autre part, il y a le concept physique du son : **toute onde de pression de fréquence comprise entre 20 Hz et 20kHz, qui se propage dans un milieu matériel**. Le son est produit par des objets qui vibrent. En général, toute activité mécanique s'accompagne d'une émission sonore. Songeons aux détonations des moteurs à explosion, aux coups de tonnerre, au bruit de la circulation automobile. L'onde sonore est une onde progressive longitudinale : l'énergie sonore est transférée grâce à la propagation de proche en proche de la vibration à travers le milieu élastique. Pour se propager, les vibrations sonores initiales ont besoin d'un milieu matériel : solide, liquide ou gaz. Le son ne se propage pas dans le vide (comme l'espace interplanétaire).

5.3 Son et bruit

Les fréquences sont trop élevées pour être perceptibles visuellement. Pour étudier les sons, il faut passer via un microphone qui va transformer le le signal sonore en signal électrique. Ce signal électrique peut alors facilement être visualisé en fonction du temps

au moyen d'un oscilloscope. La courbe obtenue sur l'écran s'appelle un oscillogramme. Elle permet d'étudier l'amplitude, la fréquence du son, etc. (Voir figure 5.3) A l'aide de d'un oscilloscope, on peut facilement observer que :

- Le son émis par un diapason est *harmonique*. On parle de *son sinusoïdal* ou *simple*.
- Le son émis par un instrument de musique n'est plus harmonique mais présente un caractère périodique. On parle de *son musical* ou de *son complexe*.
- Le son produit lorsqu'on frappe ses mains n'est ni harmonique, ni périodique. On parle de *bruit*. (Voir figure 5.4)

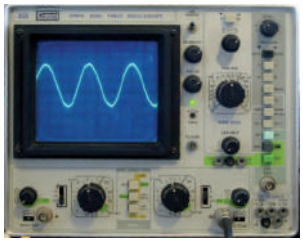


FIGURE 5.3 – Un oscilloscope permet de visualiser les signaux sonores qui ont été transformés en signaux électriques. Ici, l'écran montre un sinusoïde qui correspond à un son pur.

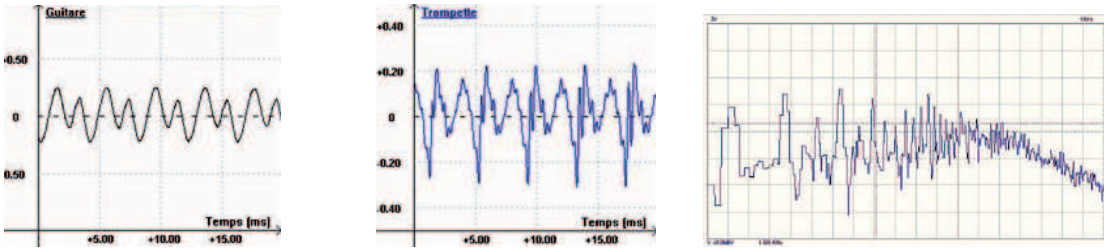


FIGURE 5.4 – Trois oscillogrammes de sons complexes (a) une guitare, (b) une trompette ; et (c) un bruit.

5.4 Vitesse du son

A une température donnée, la vitesse de propagation du son dans l'air ne dépend pas de la pression. A 0°C et 1 atm la vitesse est de 331.45 m/s. La variation du module de la vitesse du son dans l'air en fonction de la température *absolue* T (mesurée en degrés Kelvin, K) est donnée de façon approximative par :

$$v \approx 20\sqrt{T}$$

Pour trouver T, on ajoute 273° à la température absolue exprimée en degrés Celsius. Par exemple, à 20°C, $T = 293$ K et on trouve $v = 20\sqrt{293} = 342$ m/s. Sauf autrement spécifié, nous prendrons une vitesse de 340 m/s pour la résolution des exercices. Le tableau 5.5 donne quelques exemples de vitesse du son dans différents matériaux. On notera en particulier que la vitesse du son est plus grande dans les matériaux de forte densité. Par exemple, la vitesse du son est plus de quatre fois plus élevée dans l'eau que dans l'air.

Matériau	Température (°C)	Vitesse (m/s)
Caoutchouc vulcanisé	0	54
Bisulfure de carbone	0	189
Air	0	331,45
Vapeur d'eau	0	401
Liège		500
Tétrachlorure de carbone	23	929
Hélium	0	970
Chloroforme	24	1001
Plomb	20	1227
Hydrogène	0	1270
Mercure	≈ 25	1450
Eau douce	25	1493
Eau de mer	20	1513
Glycérine	22	1986
Platine	20	2690
Laiton		3500
Cuivre	20	3560
Brique		3652
Bois de chêne		3850
Aluminium		5104
Granite		6000

FIGURE 5.5 – Vitesse du son dans différents matériaux. On remarque que, en général, plus la densité du matériau est élevée plus grand est la vitesse du son.

5.5 Caractéristiques d'un son

5.5.1 Intensité

Une onde sonore change la distribution des atomes : c'est un ébranlement qui se propage dans un milieu. A ce changement est associée une énergie qui se propage avec l'onde. La cadence à laquelle l'énergie est émise, est la *puissance sonore*. Un personne émet une puissance sonore d'environ 10^{-5} W en conversation normale et 10^{-3} W si elle crie. L'énergie sonore est distribuée sur le front d'onde, et dans le cas d'une onde sphérique isotrope, cette distribution d'énergie est uniforme dans toutes les directions.[1] Lorsqu'un détecteur (par exemple l'oreille) intercepte une partie du front d'onde, il mesure une quantité d'énergie qui dépend de la surface qu'il expose à l'onde et du temps pendant qu'il la reçoit. On peut donc conclure que ce qui caractérise une onde est l'énergie qu'elle transporte par unité de temps et par unité de surface, c'est-à-dire **l'intensité sonore**. Le son peut être plus ou moins intense. Cela dépend de :

- *La source* : par exemple le vrombissement du réacteur d'avion est perçu plus fort que le ronronnement du chat.
- *La distance* entre la source et l'auditeur. Par exemple le son est plus fort lorsque l'auditeur est plus proche. (Voir figures 5.6 et 5.7).

L'intensité distingue un son fort d'un son faible. Elle dépend de la source mais aussi de la distance entre la source et l'auditeur. L'expérience montre que plus l'amplitude de la vibration est grande plus le son est fort. (*Rappel* : amplitude = écart maximum par rapport à la position d'équilibre).

1. L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction. Le contraire de l'isotropie est l'anisotropie.

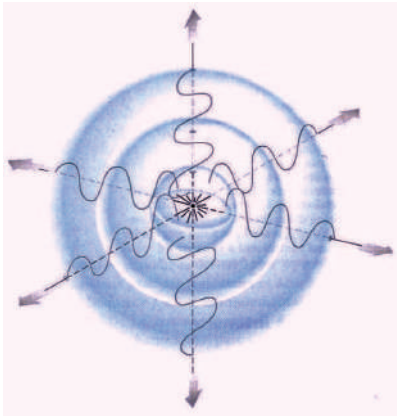


FIGURE 5.6 – Une onde produite par une source ponctuelle se propage uniformément dans toutes les directions. L'énergie est transférée sous la forme d'une onde sphérique. Comme la surface de la sphère ($4\pi R^2$) augmente, l'intensité sonore, c'est-à-dire l'énergie sonore reçue par unité d'aire diminue en $1/R^2$ et l'amplitude de l'onde diminue en $1/R$.

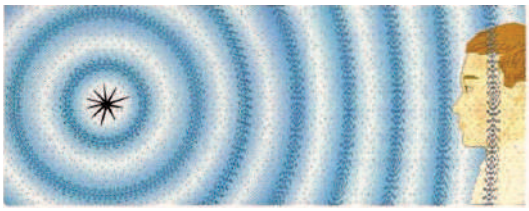


FIGURE 5.7 – Le rayon d'une onde sphérique en expansion, augmente et le front d'ondes s'aplatit. A très grandes distances, le front d'onde est assez plat pour que l'ébranlement ressemble à une onde plane.

Exemple Un explosion sous-marine a été détectée à 100 m du point de l'explosion et l'intensité a été mesurée à 1GW/m^2. Au bout de 1 s, le son a été détecté à 1.5 km du point de l'explosion. Quelle était l'intensité à cette dernière position ? (On négligera les pertes par absorption).

Solution Les ondes sonores sont des ondes sphériques. La puissance qui traverse la premier sphère est la même que la puissance qui traverse la seconde sphère.

$$I_1\left(4\pi R_1^2\right) = I_2\left(4\pi R_2^2\right)$$

Alors :

$$I_2 = \frac{I_1 R_1^2}{R_2^2} = \frac{1\times 10^9 \times 100^2}{\left(1.5\times 10^3\right)^2} = 4.4\times 10^6 \ = 4 \text{ MW/m}^2$$

L'intensité des sons naturels varie énormément, du faible bourdonnement d'un moustique au rugissement d'un volcan et l'oreille humaine est remarquablement sensible à une très large plage de variation de l'intensité. Nous pouvons supporter des intensités jusqu'à environ 1 W/m^2, qui correspond à un son tellement fort qu'on commence à ne plus entendre : c'est le *seuil de douleur* et il correspond à une pression acoustique d'environ seulement 10^{-4} atm ou 10^4 Pa. A l'autre extrême, l'oreille détecte juste des sons d'intensité aussi faible que 10^{-12} W/m^2. C'est le *seuil d'audibilité*, qui est associé à une pression acoustique d'environ 10^{-12} W/m^2. A 1 kHz, cette pression acoustique correspond à une vibration des molécules d'aire d'amplitude environ 10^{-6} mm (!).

L'intervalle d'intensité des sons audibles, étant très grand, il est pratique d'utiliser une échelle logarithmique appelée échelle décibel. Le décibel, du nom de Graham Bell, l'inventeur du téléphone, est l'unité de niveau sonore. La relation entre niveau d'intensité (β) et intensité (I) de l'onde sonore est la suivante :

$$\boxed{\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}} \tag{5.1}$$

Où I est l'intensité de l'onde sonore et I_0 est 10^{-12} W/m2, intensité de référence arbitraire qui correspond au seuil d'audibilité.

Exemple 1 : Si $I = 10^{-5}$ W/m2 : $\beta = 10 \log \frac{10^{-5}}{10^{-12}} = 70$ dB.

Exemple 2 : Supposons que l'intensité de l'onde sonore soit 10 fois plus grande : $\beta = 10 \log \frac{10^{-4}}{10^{-12}} = 80$ dB. Donc lorsque l'onde sonore est dix fois plus grande, le niveau d'intensité sonore augmente de 10 dB.

Exemple 3 : Supposons que l'intensité de l'onde sonore soit multipliée par deux : $\beta = 10 \log \frac{2 \times 10^{-5}}{10^{-12}} = 73$ dB.

Conclusion Si on multiplie la source par 2, on augmente l'intensité de 3 dB. Si on multiplie la source par 10, on augmente l'intensité de 10 dB

Rapport des intensités	Niveau des intensités (dB)
100 000 000 000 : 1	110
1 000 000 : 1	60
10 000 : 1	40
100 : 1	20
10 : 1	10
4 : 1	6
2 : 1	3
1 : 1	0
$\frac{1}{2}$: 1	–3
$\frac{1}{4}$: 1	–6
$\frac{1}{10}$: 1	–10
$\frac{1}{100}$: 1	–20
$\frac{1}{1000}$: 1	–30

FIGURE 5.8 – Rapport des intensités et niveau des intensités. On remarquera entre le niveau 1 dB et le niveau 110 dB, il y a un rapport d'intensité de 100 milliards !!!

Rappel de quelques propriétés des logarithmes Il est utile pour pouvoir résoudre les problèmes d'acoustique de connaître quelques propriétés des logarithmes.

$$\log x = y \Leftrightarrow 10^y = x$$

$$\log xy = \log x + \log y$$

$$\log \frac{x}{y} = \log x - \log y$$

$$\log x^n = n \log x$$

Source sonore	Niveau d'intensité (dB)	
Fusée puissante	≈ 180	
Avion à réaction	140	(*intolérable*)
Avion lors du décollage (à 30 m–60 m)	≈ 125	(*douloureux*)
Concert de rock (1,0 W/m^2)	≈ 120	
Hurlement à 20 cm de l'oreille	120	(*nuisible immédiatement*)
Marteau-piqueur	110	
Métro (10^{-2} W/m^2)	100	(*nuisible au bout de 2 h*)
Voiture sans pot d'échappement	100	
Cri (à 1,5 m)	100	(*très fort*)
Klaxon de voiture (très sonore)	95	
Poids lourd (à 15 m)	90	
Rue de ville	80	(*nuisible au bout de 8 h*)
Sèche-cheveux	80	
Musique très sonore	80	
Circulation sur une autoroute	75	(*bruyant*)
Intérieur d'une voiture	≈ 70	
Chasse d'eau (de WC)	≈ 67	
Magasin bruyant (10^{-6} W/m^2)	60	
Conversation normale (à 1 m)	60	(*modéré*)
Bureau	50	
Salle de séjour (en ville)	40	
Chambre à coucher (10^{-9} W/m^2)	30	(*calme*)
Bibliothèque	30	
Studio de radiodiffusion (10^{-10} W/m^2)	20	(*très calme*)
Chuchotement	20	
Ronronnement d'un chat	15	(*à peine audible*)
Frôlements des feuilles d'arbres	≈ 10	
Seuil d'audibilité (10^{-12} W/m^2)	0	

FIGURE 5.9 – Niveaux d'intensité approximatifs en dB. On notera que des niveaux supérieurs à 70 dB deviennent vite nuisibles.

Exemple En comparant deux réunions publiques, on trouve que l'intensité sonore de l'une est 32 fois plus grand que l'autre. Quelle est la différence de niveau d'intensité exprimée en dB ?

Solution

$$\left.\begin{aligned}\beta_1 &= 10\log\frac{I_1}{I_0}\\ \beta_2 &= 10\log\frac{I_2}{I_0}\end{aligned}\right\} \Rightarrow \Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 10\log\frac{I_2}{I_0} - 10\log\frac{I_1}{I_0} = 10\log\frac{I_2}{I_1}$$

Or $I_2 = 32I_1$ donc

$$\Delta\beta = 10\log\frac{32I_1}{I_1} = 10\log 2^5 = 50\log 2 = 15.05 \text{ dB}$$

Exemple Considérons 10 violons identiques, chacun de niveau 70 dB. Quel sera le niveau sonore s'ils jouent ensemble ?

Solution Pour un violon :

$$\beta_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} = 70 \text{ dB}$$

Pour 10 violons identiques :

$$\beta_{10} = 10 \log \frac{I_{10}}{I_0} = 10 \log \frac{10 I_1}{I_0} = 10 \log 10 + 10 \log \frac{I_{10}}{I_0} = 10 + 70 = 80 \text{ dB}$$

5.5.2 Hauteur

La hauteur d'un son est une perception capable de distinguer les différentes fréquences du son. On dira que la voix d'une soprano est haute comparée à une voix basse. La hauteur distingue un son aigu d'un son grave. Elle est liée à la fréquence de la vibration.[Grave = basse fréquence et Aigu = haute fréquence] (rappel ; fréquence = nombre de vibrations par seconde. (1 vib / s = 1 hertz = 1 Hz)

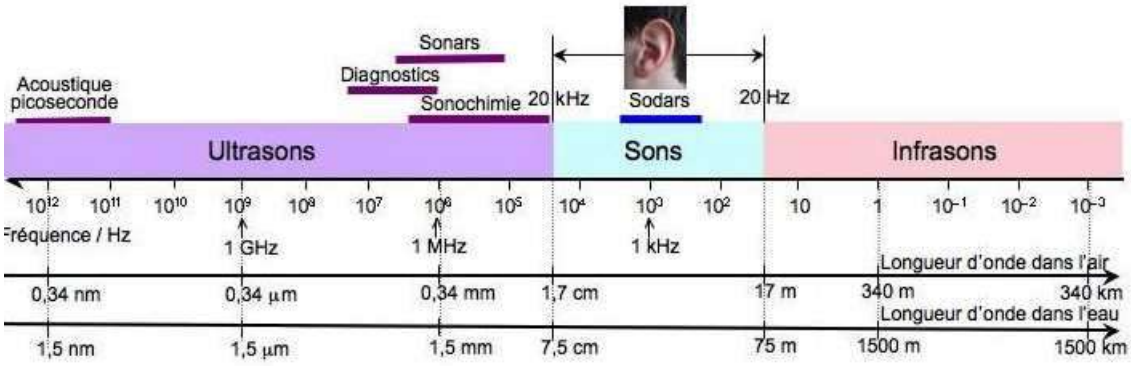


FIGURE 5.10 – Le spectre des sons.

L'oreille humaine est sensible aux sons compris entre 16 Hz et 20.000 Hz. (gamme des sons audibles : voir figure 5.11). Au dessus de 20.000 Hz, on trouve les ultra-sons auxquels les chiens, les dauphins et les chauves-souris sont sensibles et en dessous de 20 Hz, on trouve les infrasons.(Voir figure 5.10)

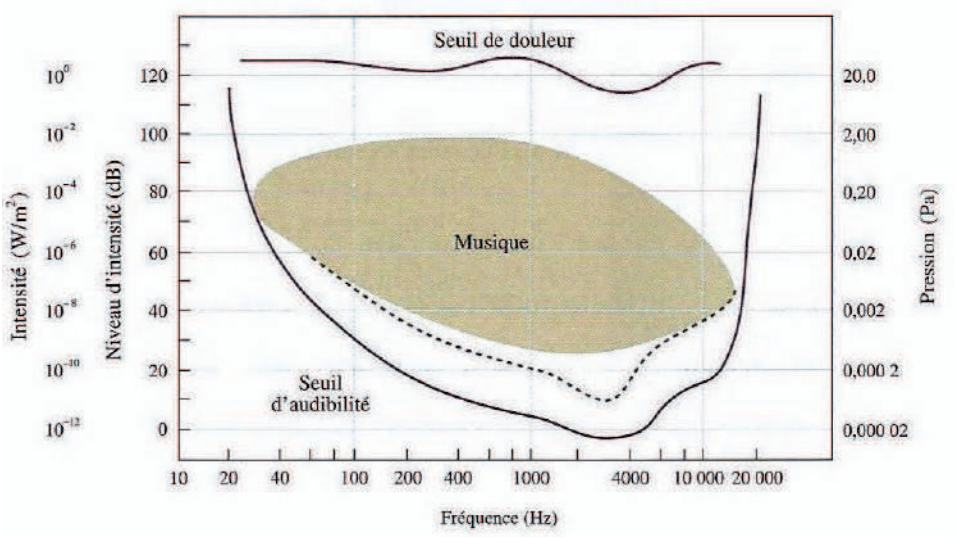


FIGURE 5.11 – Environ un pourcent des gens sont capables d'entendre un son de niveau d'intensité au-dessous de la courbe inférieure. Peut-être cinquante pourcent peuvent entendre un niveau au-dessous de la courbe en pointillé. La région ombragée correspond au niveau courant de la musique, du pianissimo au fortissimo.

5.5.3 Timbre

Deux sons de même fréquence émis par deux instruments de musiques différents nous paraissent complètement différents à l'audition.

Ainsi le "la" de fréquence $f = 442$ Hz joué par une flûte n'est pas identique au "la" joué par une clarinette. La figure 5.12 montre le même son émis respectivement par un cor, un trombone ténor et une clarinette. Les trois instruments émettent un *fa* à la fréquence de 350 Hz. On constate que les signaux bien que les fréquences et amplitudes soient égales. Les sons ne sont plus harmoniques mais complexes.

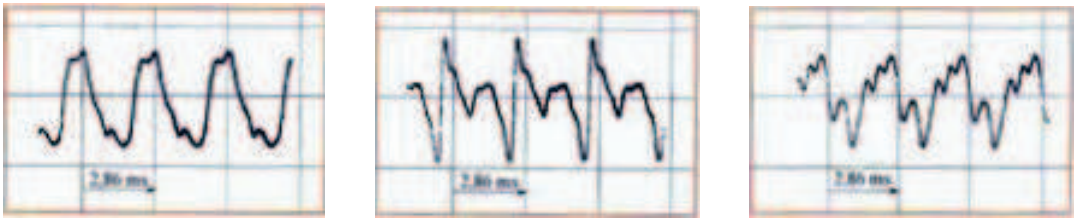


FIGURE 5.12 – Oscilliogramme d'un même son émis par trois instruments différents : (a) un cor, (b) un trombone ténor, (c) une clarinette.

Un son complexe de fréquence f est obtenu par la superposition de plusieurs sons harmoniques de fréquence f, $2f$, $3f$, etc. Il n'est pas nécessaire qu'ils aient la même amplitude ou la même constante de phase mais il est nécessaire que leur fréquence soit des multiples entiers d'une même fréquence appelée **fréquence fondamentale** . Les fréquences $2f$, $3f$, etc, sont appelées **fréquences harmoniques.**

La figure 5.13 est le graphique de l'élongation complexe résultante lorsque trois vibrations de fréquence f, $2f$ et $3f$ s'additionnent : les élongations des différentes oscillateurs

sont les suivantes :

$$\begin{array}{ll} y_1(t) = 3\sin(2\pi t + \pi) & (f_1 = 1 \text{ Hz}, T_1 = 1 \text{ s}) \\ y_2(t) = 1\sin(4\pi t) & (f_2 = 2 \text{ Hz}, T_2 = 0.5 \text{ s}) \\ y_3(t) = 2\sin(6\pi t) & (f_3 = 3 \text{ Hz}, T_3 = \ 0.33 \text{ s}) \end{array}$$

f_1 est la fréquence fondamentale, f_2 et f_3 sont les fréquences harmoniques. On dira aussi que f_1 est le premier harmonique, f_2 le deuxième harmonique, et ainsi de suite. [2] La note

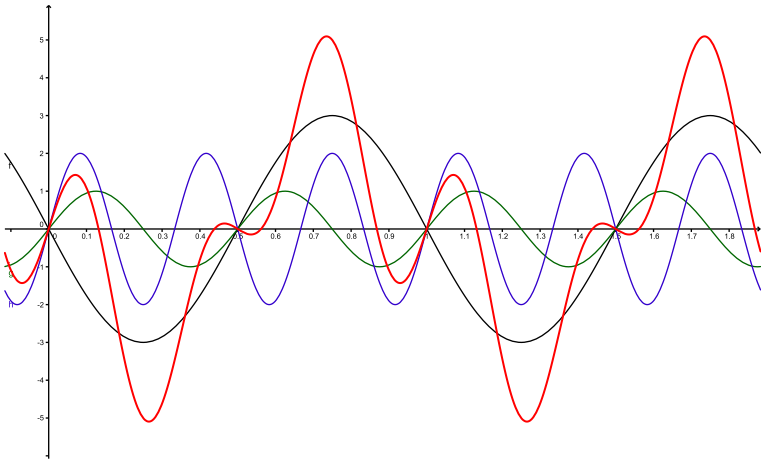


FIGURE 5.13 – Addition de trois vibrations de fréquence f, $2f$, $3f$,.

de musique est un ensemble de sons de fréquences différentes. Ainsi la flûte possède douze harmoniques alors que la clarinette en émet trente ce qui fait que les sons émis par ces deux instruments ne sont pas les mêmes.

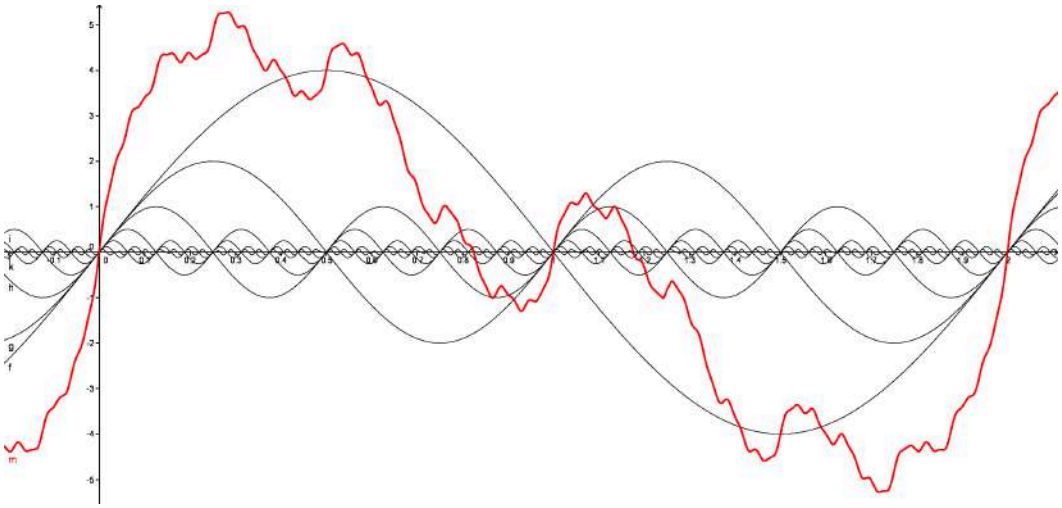


FIGURE 5.14 – Combinaison de sept harmoniques. On voit que la vibration résultante devient assez complexe.

2. Harmonique est un substantif masculin qui s'utilise souvent au pluriel. On dira donc **un** harmonique et pas une harmonique !

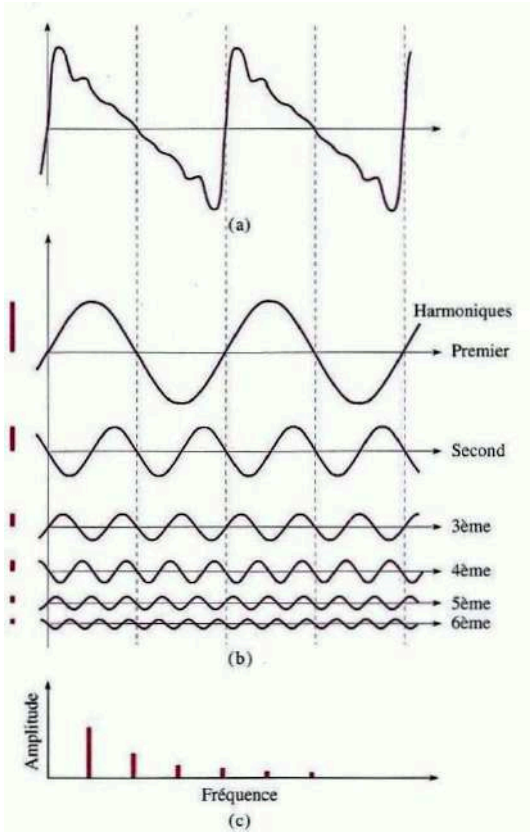


FIGURE 5.15 – (a) Synthèse d'une onde en "dents de scie". (b) Ici les six premiers harmoniques se combinent pour former une courbe qui ressemble clairement à la courbe en dents de scie. En ajoutant une douzaine d'autres harmoniques, on obtient une meilleure approximation. (c) Une représentation des amplitudes des différents harmoniques qui contribuent au signal final. C'est ce qu'on appelle un spectre de fréquence.

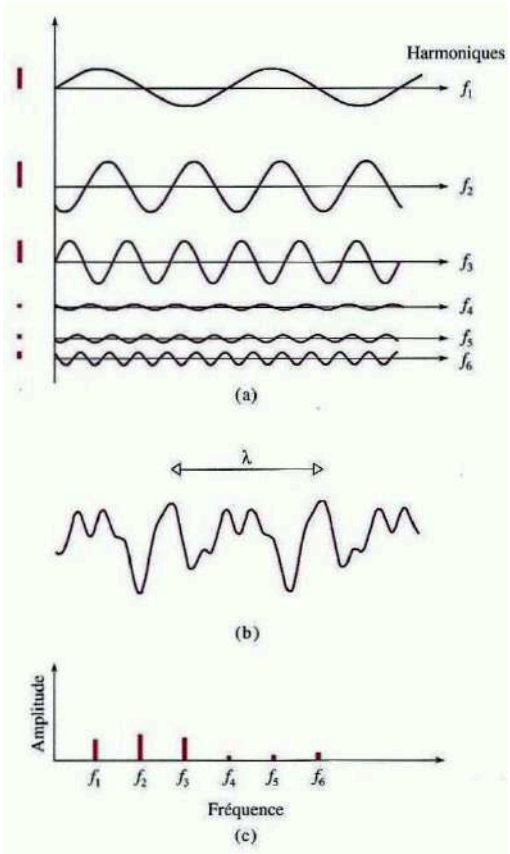


FIGURE 5.16 – (a) Six ondes sinusoïdales. (b) Onde qui résulte de la superposition de ces ondes. (c) Le spectre de fréquence associé. Chaque ligne verticale représente l'amplitude de l'harmonique correspondant dans (a). Noter que $f_2 = 2f_1$ $f_3 = 3f_1$ $f_4 = 4f_1$ et ainsi de suite.

5.6 L'oreille

5.6.1 Anatomie de l'oreille

Le pavillon capte les sons et les dirige vers le conduit auditif externe jusqu'au tympan qui se met à vibrer. Pour amplifier ces vibrations, 3 os (l'étrier, le marteau et l'enclume) oscillent avec le tympan. Ils communiquent avec la cochlée dans laquelle l'énergie sonore est convertie en signaux électriques qui sont envoyés au cerveau via le nerf auditif.

5.6.2 Les dangers des bruits intenses

La cochlée est formée de capteurs sensibles aux vibrations : ce sont les cils qui trempent dans le liquide cochléen. Les cils du début sont sensibles aux sons aigus et les cils de fond sont sensibles aux sons graves. Suite au bruit trop intense (oreillette trop prêt du tympan,

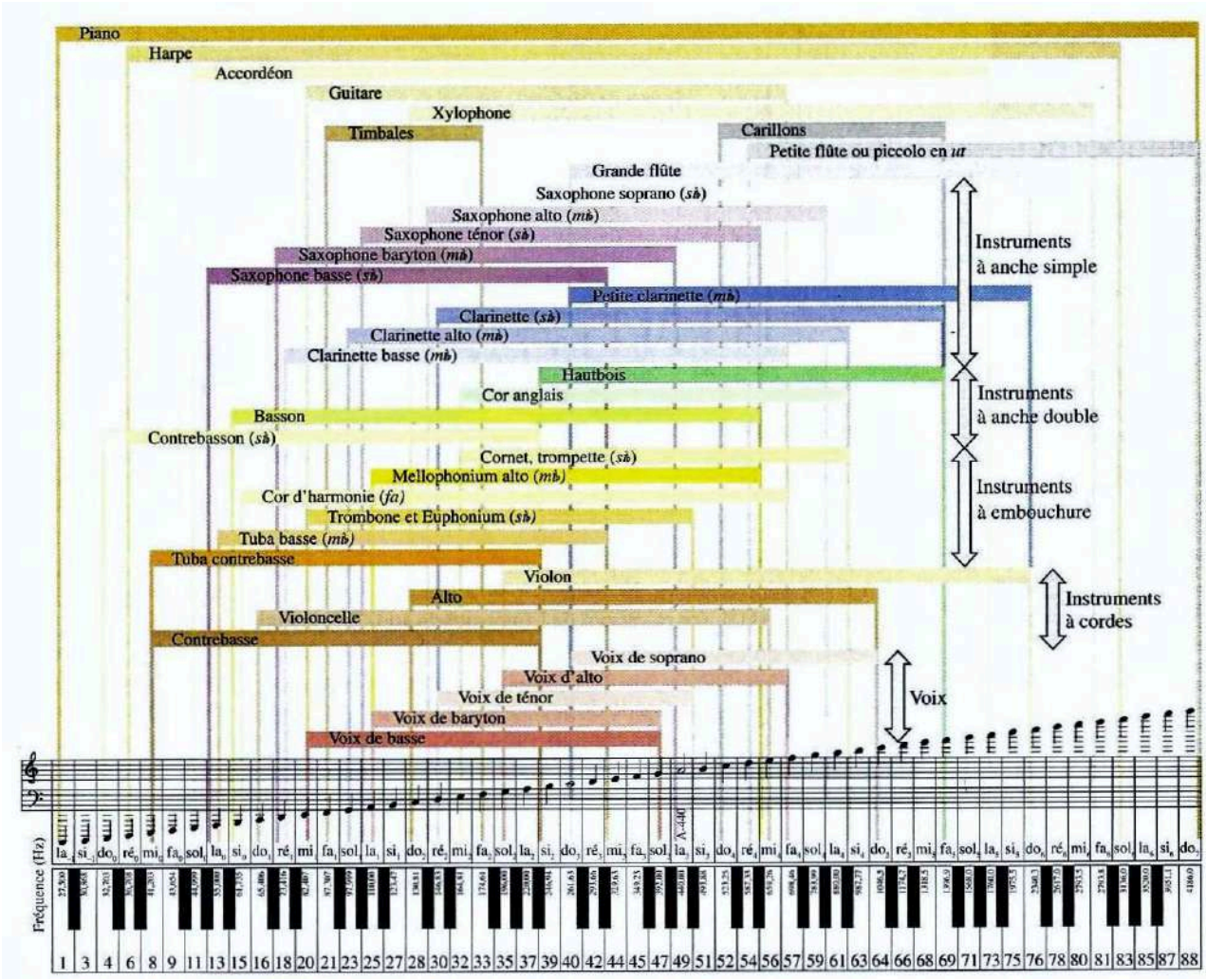


FIGURE 5.17 – Les tessitures des voix humaines et des instruments. On remarquera que le piano est capable de jouer dans une gamme de fréquences très large. Ce qui justifie qu'un piano peut soutenir un orchestre symphonique.

discothèque,etc) certains cils peuvent se casser et l'information envoyée au cerveau est erronée. C'est le début d'une certaine surdité.

5.7 Lecture : Les dangers du baladeur

5.7.1 Devenir sourd adolescent ?

C'est entre autres le problème et le danger présenté par l'utilisation quotidienne du lecteur mp3 (Baladeur, iPod, Walkman, CD, MP3 ou autres). Chaque année, sur environ trente étudiants, au moins trois souffrent de sifflements d'oreilles ou d'acouphènes certainement irréversibles, généralement à la suite de soirées en boîtes, concerts, raves, festivals ou discothèques.

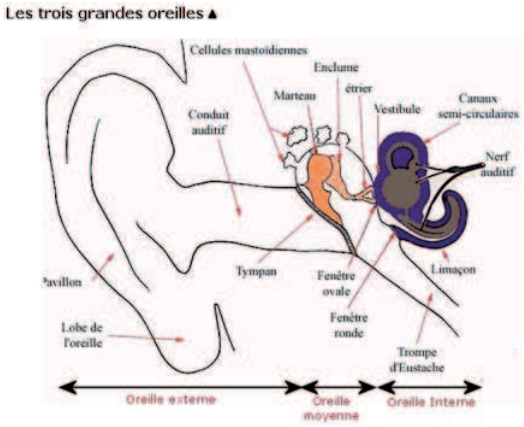


FIGURE 5.18 – Anatomie de l'oreille. On notera que l'oreille est divisée en trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne, l'oreille interne.

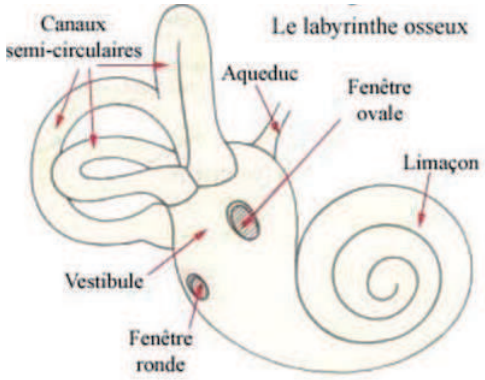


FIGURE 5.19 – Détail de l'oreille interne.

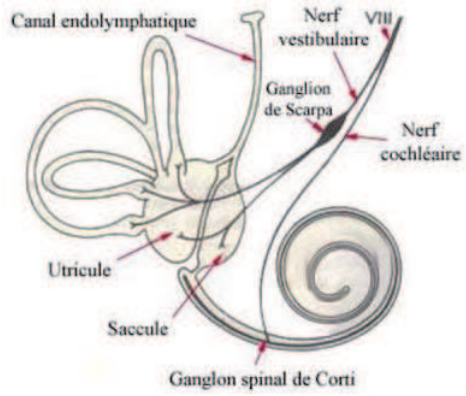


FIGURE 5.20 – Détail de l'oreille interne.

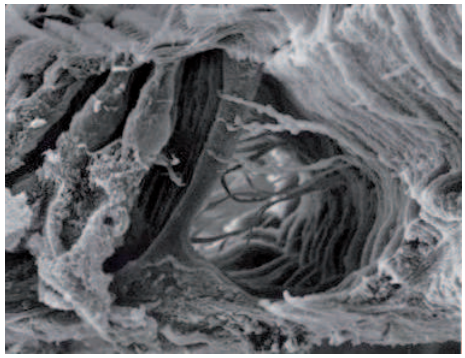


FIGURE 5.21 – Microscope électronique à balayage. Le tunnel de Corti avec les fibres nerveuses qui le traversent, se dirigeant vers les cellules ciliées. Sur la photo, les fibres nerveuses ne sont pas intactes et apparaissent plus courte.

5.7.2 Pourquoi écoute-t-on aussi fort son baladeur mp3 ?

En partie pour compenser l'absence de vibrations abdominales générées par les graves que les basses les plus efficientes traduites par un casque ne peuvent provoquer. Certaines personnes écoutent leurs musiques avec leur lecteur mp3 de façon forte car il y a du bruit aux alentours, elles sont dans le métro, le bus, le RER, le tramway par exemple. Mais d'autres personnes font exprès d'écouter leurs musiques très fort pour se faire remarquer, pour sortir du lot et attention au danger pour l'audition ! Il faut savoir qu'aujourd'hui tous les lecteurs mp3 en vente ne doivent pas pouvoir délivrer une pression acoustique supérieure à 100 dB. Ainsi, certaines musiques dont la dynamique est inférieure à 3 dB (écart maximum entre les niveaux faibles et forts) permettront d'infliger à vos oreilles des niveaux compris entre 97 et 100 dB ! Enfin, il faut garder à l'esprit que rien n'interdit à l'acquéreur potentiel d'un lecteur mp3 de s'équiper d'une paire d'oreillette ou d'un casque présentant une sensibilité supérieure, vendu séparément et lui permettant de s'affranchir

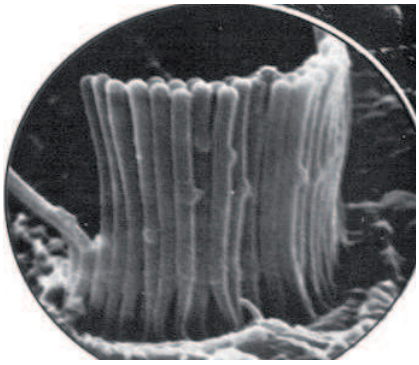


FIGURE 5.22 – Cette photo prise sous microscope électronique montre trois rangée de cellules auditives ciliées dont on voit les cils rigides. c'est l'oscillation de ces cils qui stimule la cellule auditive à produire une impulsion électrique destinée à informer le cerveau.

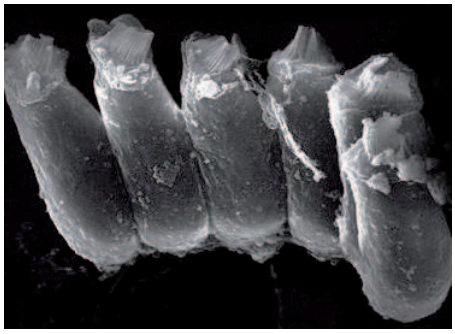


FIGURE 5.23 – Cellules auditives ciliées vues au microscope électronique à balayage.

allègrement de la protection de cette limite des 100 dB.

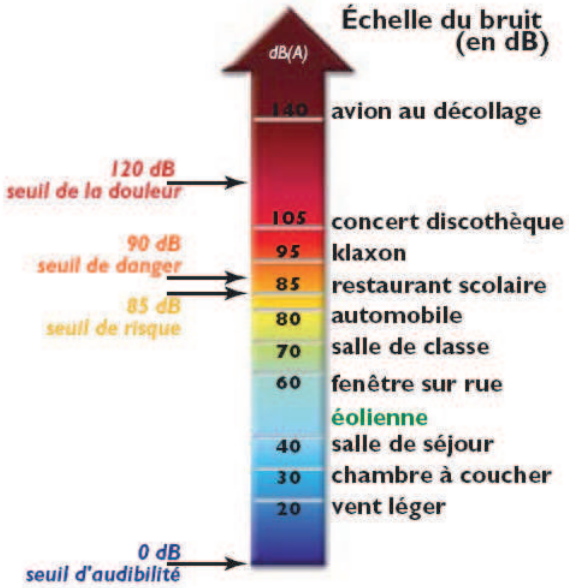


FIGURE 5.24 – Echelle d'intensité.

5.7.3 La différence entre les musiques

Cette différence réside dans le niveau de pression acoustique moyen de celles-ci. Si les pressions acoustiques maximales sont les mêmes lors de l'audition de celles-ci, les premières ne bénéficient généralement que d'un écart de dynamique de 3 à moins de 3 dB quand certaines musiques de variétés, le jazz ou musiques dites classiques, présentent des

écarts pouvant dépasser les 25 dB. Il est aisément compréhensible que pendant ces plages de "silence", l'oreille peut se régénérer, ce qui n'est absolument pas le cas dans celui de musiques comme la trance, la techno ou le RAP. deux heures d'écoute à fond peuvent représenter deux heures d'écoute avec une pression acoustique oscillant entre 107 et 110 dB dans le meilleur des cas.

5.7.4 Le risque pour l'ouïe

Afin de vous donner une idée aussi précise que possible des dangers que vous encourrez, vous devez savoir que toute personne qui, à la suite d'un festival, d'un concert bruyant a souffert de sifflements d'oreilles ou de bourdonnements est une personne dont les qualités auditives ont été atteintes pour quelques heures ou définitivement. Il faut savoir que lorsque l'on souffre de tels désagréments, il est déjà trop souvent trop tard, le mal est fait, et même si cela n'est pas immédiatement perceptible, c'est généralement irrémédiable. Dans un pareil cas, vous avez moins de 24 heures (limite extrême, 72 heures) pour trouver un ORL, spécialiste de ce genre d'accident, et vous faire traiter dans l'urgence. Après c'est trop tard ! Nous ne mettrons jamais assez en garde les amateurs de musiques telles que la techno, trance, électro, housse, ainsi que l'ensemble des professionnels de la sonorisation et autres discothèques, mais aussi tous ceux qui gravitent autour de ces circuits (garçons, serveuses, techniciens, etc.) des dangers que représentent l'exposition prolongée à d'importantes pressions sonores. Les dégradations de l'audition se situent en particulier au niveau du haut médium et de l'aiguë. Si une musique diffusée avec une perte dans les graves reste acceptable, une musique dépourvue du haut de son spectre s'avère rapidement pénible à l'écoute. On a alors une sensation d'écouter avec des bouchons, du coton dans les oreilles.

5.8 La musique

Dans le solfège, la note de musique est littéralement « notée » sur une partition afin d'être lue par le musicien interprète. On lui attribue quatre caractéristiques principales : durée, hauteur, intensité et timbre.

La note représente par sa forme une durée (dimension horizontale du solfège), et sa position sur la portée représente une hauteur (dimension verticale).

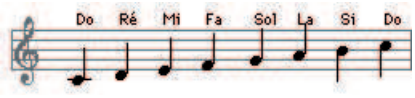


FIGURE 5.25 – Les notes de musique.

5.8.1 Fréquence

Tout son musical (ou note) possède une fréquence fondamentale correspondant à sa hauteur. Deux notes dont les fréquences fondamentales ont un ratio équivalent à deux (c'est-à-dire la moitié, le double, le quadruple...) donnent deux sons très similaires. Cette observation permet de regrouper toutes les notes qui ont cette propriété dans la même catégorie de hauteur. (Voir figure 5.26).

Fréquences des hauteurs

Note\octave	0	1	2	3	4	5	6	7
Do	32,70Hz	65,41Hz	130,81Hz	261,63Hz	523,25Hz	1046,50Hz	2093,00Hz	4186,01Hz
Do♯	34,65Hz	69,30Hz	138,59Hz	277,18Hz	554,37Hz	1108,73Hz	2217,46Hz	4434,92Hz
Ré	36,71Hz	73,42Hz	146,83Hz	293,66Hz	587,33Hz	1174,66Hz	2349,32Hz	4698,64Hz
Ré♯	38,89Hz	77,78Hz	155,56Hz	311,13Hz	622,25Hz	1244,51Hz	2489,02Hz	4978,03Hz
Mi	41,20Hz	82,41Hz	164,81Hz	329,63Hz	659,26Hz	1318,51Hz	2637,02Hz	5274,04Hz
Fa	43,65Hz	87,31Hz	174,61Hz	349,23Hz	698,46Hz	1396,91Hz	2793,83Hz	5587,65Hz
Fa♯	46,25Hz	92,50Hz	185,00Hz	369,99Hz	739,99Hz	1479,98Hz	2959,96Hz	5919,91Hz
Sol	49,00Hz	98,00Hz	196,00Hz	392,00Hz	783,99Hz	1567,98Hz	3135,96Hz	6271,93Hz
Sol♯	51,91Hz	103,83Hz	207,65Hz	415,30Hz	830,61Hz	1661,22Hz	3322,44Hz	6644,88Hz
La	55,00Hz	110,00Hz	220,00Hz	440,00Hz	880,00Hz	1760,00Hz	3520,00Hz	7040,00Hz
La♯	58,27Hz	116,54Hz	233,08Hz	466,16Hz	932,33Hz	1864,66Hz	3729,31Hz	7458,62Hz
Si	61,74Hz	123,47Hz	246,94Hz	493,88Hz	987,77Hz	1975,53Hz	3951,07Hz	7902,13Hz

FIGURE 5.26 – Les fréquences des notes de musique.

Dans la musique occidentale, les différentes catégories de hauteurs sont au nombre de sept et s'appellent : do, ré, mi, fa, sol, la et si. L'intervalle compris entre deux hauteurs dont la fréquence de l'une vaut le double (ou la moitié) de l'autre s'appelle une octave. Pour distinguer deux notes de même nom dans deux octaves différentes, on numérote les octaves et donne ce numéro aux notes correspondantes : par exemple, le la_3 (ou A4) a une fréquence de 440 Hz dans la norme internationale. Le la_3 sert de référence pour accorder les instruments de musique et est donné par un diapason. La formule est : $f_n = f_0 \times a^n$. Avec a la racine douzième de deux et n le nombre de demi-tons au-dessus de la note de départ f_0. On s'aperçoit que la fréquence croit de manière géométrique par rapport à la note.

5.9 Exercices

Sauf indication particulière, pour tous les exercices, la valeur du son est de 340 m/s dans l'air et 1500 m/s dans l'eau.

1. Vrai ou faux La longueur d'onde d'un son est d'autant plus petite que
   (a) le son est aigu
   (b) L'intensité est faible
   (c) La fréquence est basse
   (d) La période est grande
   (e) La vitesse de l'onde est faible

2. Quel son a la plus grande longueur d'onde ?
   (a) Un son aigu dans l'air

(b) Un son grave dans l'eau

(c) Un son aigu dans l'eau

3. Vrai ou faux

(a) Si la hauteur d'un son augmente, sa longueur d'onde diminue.

(b) La vitesse de propagation des ultrasons est plus élevée que celle des sons audibles.

(c) La fréquence des ultrasons est plus élevée que celle des sons audibles.

(d) Un son de 60 dB est 20 fois plus intense qu'un son de 40 dB.

4. Evaluer le retard entre les sons perçus par les deux oreilles.

(a) Lorsque la source sonore est située en face des oreilles.

(b) Lorsqu'elle se trouve au loin dans une direction à 45°.

(C'est parce que ce retard dépend de la direction d'où vient le son que nous pouvons estimer cette direction).

5. Voici 5 oscillogrammes (Figure 5.27). Lesquels correspondent à un bruit, un son simple, un son complexe.

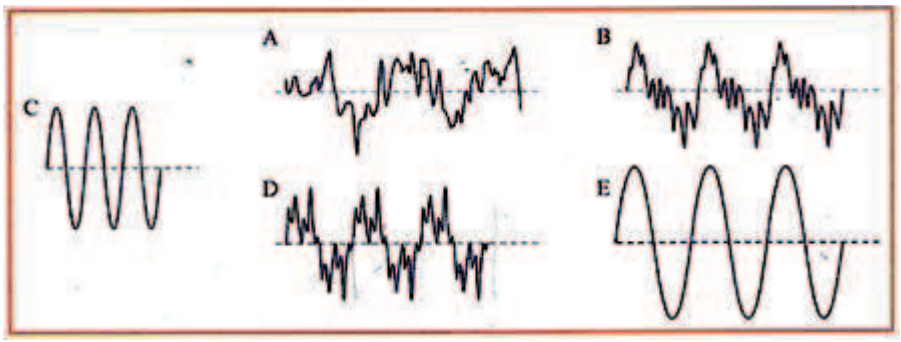


FIGURE 5.27 – 5 oscillogrammes.

6. La fréquence la plus basse perçue par l'oreille humaine est de 16 Hz et la plus haute de 20 kHz. Quelles sont les longueurs d'onde correspondantes dans l'air ?
(Rép : $\lambda = 21.25$ m, $\lambda = 1.70$ cm).

7. Un son se propage dans l'air à 330 m/s et dans l'eau de mer à 1500 m/s. La fréquence de vibration est égale à 440 Hz. Déterminer sa période et les longueurs d'onde du son dans les deux milieux de propagation.
(Rép : 0.0023 s ; 0.75 m ; 3.4 m)

8. Quelles sont la longueur d'onde et la période d'une onde ultrasonique de 80 kHz émise dans l'air ?
(Rép : $\lambda = 4.25$ mm, $T = 1.25 \times 10^{-5}$ ms).

9. Quelles sont la longueur d'onde et la période d'une onde sonore de 125 Hz dans l'air et dans l'eau ?
(Rép : Dans l'air $\lambda = 2.72$ m, $T = 8$ ms. Dans l'eau $\lambda = 12.0$ m, $T = 8$ ms).

10. La chauve-souris émet des ondes ultrasonores dont la plus courte longueur d'onde est de 3.4 mm. Calculer la fréquence correspondante.
(Rép : 100 kHz)

11. La hauteur du diapason en fonte donnant le la3 (440 Hz) est de 25 cm. Quelle est la vitesse de propagation de la déformation dans la fonte ?

12. Un orage éclate et un observateur mesure 3 s entre la perception de l'éclair et celle du son. A quelle distance se trouve l'orage ?
(Rép = $d = 1020$ m).

13. Une station côtière émet simultanément deux signaux sonores, l'un transmis par l'air et l'autre par l'eau. Les deux signaux sont captés par un navire à 30.2 s d'intervalle. Déterminer la distance qui sépare le navire de la station émettrice. (Rép : 13 277 m)

14. On lâche une pierre dans un puits et le bruit de l'impact de l'eau se fait entendre 3 s plus tard. Quelle est la profondeur du puits ?
(Rép : $d = 40.8$ m avec $g = 9.81$ m/s^2).

15. Un navigateur volant horizontalement à la vitesse de 450 km/h et à une altitude de 500 m perçoit à un instant donné une forte lueur au sol, au-dessous de lui. Quelle distance aura-t-il parcourue à l'instant où il entendra le bruit ayant produit la lueur ?

16. Calculer en décibels le niveau d'intensité sonore d'une source dont l'intensité est de 10^{-4} W/m^2.
(Rép : 80 dB).

17. Une chaine Hi-Fi fonctionne à un niveau d'intensité de 45 dB. En supposant que deux chaînes fonctionnent au même niveau d'intensité sonore de 45 dB, quelle est le niveau d'intensité sonore totale ?
(Rép : 48 dB).

18. Un ouvrier frappe l'extrémité d'une canalisation métallique de 951.25 m. A l'autre extrémité du tuyau, un observateur note un retard de 2.5 s du son transmis dans l'air du tuyau et celui transmis dans le métal. Déduis la vitesse du son dans ce métal

(dans l'air : $v = 340$ m/s). Déduis le rapport des vitesses du son dans le gaz d'éclairage et l'air, sachant que lorsque le tuyau est rempli de gaz le retard (gaz - métal) est de 2 s.

19. Un canon produit un niveau sonore de 90 dB, mesuré par un détecteur placé à une certaine distance. Quelle serait l'indication du détecteur si deux canons situés à la même distance, tiraient ensemble ?

20. Un haut-parleur émet un son de fréquence 2000 Hz. Ce son se propage dans l'air.
    (a) Calculer sa période et sa longueur d'onde.
    (b) Calculer l'intensité acoustique I du son, exprimée en W/m^2, à la distance $r = 1$ m de la source ponctuelle lorsque la puissance sonore est $P = 5$ W.

    Note : L'intensité I est reliée à la puissance P par

    $$I = \frac{P}{S}$$

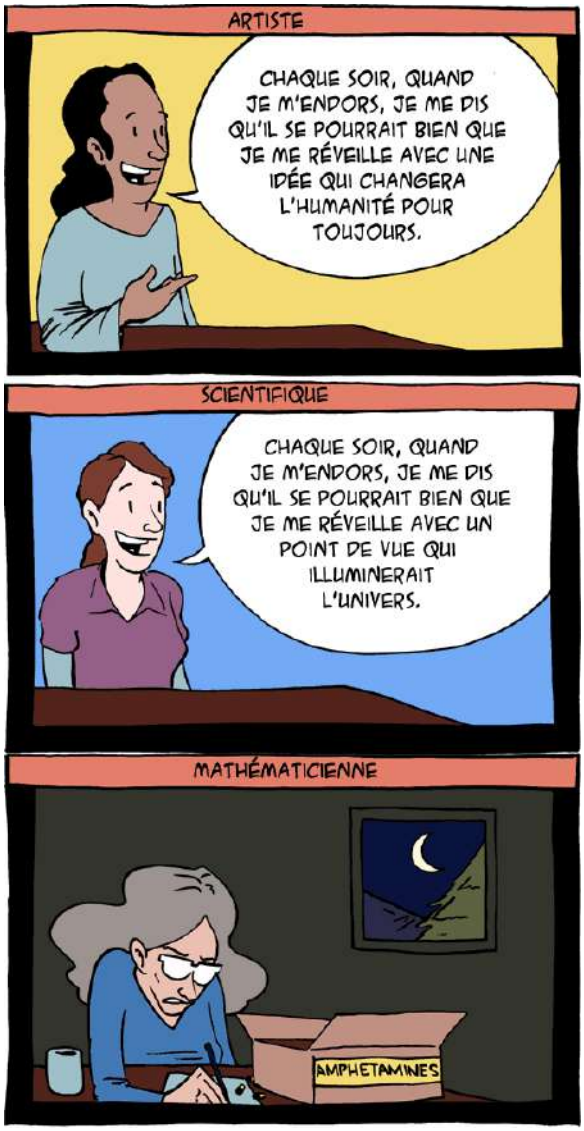
    où S est la surface de la sphère sur laquelle l'énergie sonore se répartit : $S = 4\pi r^2$.

21. Le niveau sonore à 2 m d'un marteau-piqueur est de 120 dB. En supposant qu'il émet uniformément dans toutes les directions, à quelle distance le niveau sonore tombe-t-il à 40 dB, niveau supportable ?

22. Une source sonore ponctuelle émet une onde de puissance 50 W dans un milieu homogène. Détermine l'intensité et le niveau sonore du rayonnement à 10 m de la source. Quelle est l'énergie reçue, en une seconde par un petit détecteur de superficie 1 cm^2, tenu perpendiculairement à la direction de l'onde ? (On néglige les pertes).

23. Une petite, mais bruyante imprimante produit une intensité acoustique de 56×10^{-5} W/m^2 à un point situé à 5 m. Quel est approximativement le niveau sonore en ce point et à 10 m de là ? Quelle serait l'énergie reçue en 1 s par un petit détecteur de superficie 1 cm^2 placé à 5 m de l'imprimante ?

24. Imaginons un piano dont les cordes seraient faites du même matériau et sous la même tension. La gamme de fréquence du piano s'étend de 27.5 à 4186 Hz, ce qui constitue 7 octaves. Pour rappel, on passe d'une octave à la suivante en multipliant la fréquence par deux. Si la note la plus haute est émise par une corde de 3 m de long, que doit être la longueur de la corde de la note la plus basse ? Justifier la réponse ? Quelle conclusion peut-tu tirer d'une telle conception du piano ?


ARTISTE
CHAQUE SOIR, QUAND JE M'ENDORS, JE ME DIS QU'IL SE POURRAIT BIEN QUE JE ME RÉVEILLE AVEC UNE IDÉE QUI CHANGERA L'HUMANITÉ POUR TOUJOURS.
SCIENTIFIQUE
CHAQUE SOIR, QUAND JE M'ENDORS, JE ME DIS QU'IL SE POURRAIT BIEN QUE JE ME RÉVEILLE AVEC UN POINT DE VUE QUI ILLUMINERAIT L'UNIVERS.
MATHÉMATICIENNE
AMPHETAMINES

Chapitre 6

Propagation des ondes

6.1 Propagation sans obstacles

6.1.1 Propagation sans obstacle

Les propriétés des ondes seront étudiées avec des ondes à la surface de l'eau et ce dans une cuve à ondes : large récipient à fond plat contenant quelques centimètres d'eau. Un vibreur crée des perturbations entretenues à la surface et les ondes générées sont visualisées par projection. (Voir figure 6.1). Suivant la forme du vibreur, on créera des ondes planes ou des ondes circulaires. Par divers procédés, il est possible de créer des déformations de la surface de l'eau ; ces déformations vont se propager avec une vitesse de l'ordre de quelques décimètres/seconde. Remarquons que ce n'est pas l'eau qui se propage : un bouchon flottant n'est pas entraîné lorsqu'une onde l'atteint, il oscille verticalement "sur place".

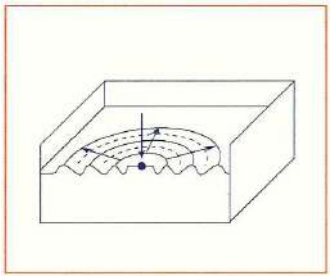


FIGURE 6.1 – Schéma d'un bac à ondes.

Ondes circulaires Laissons tomber une goutte d'eau dans la cuve. Il se forme quelques rides circulaires qui s'éloignent du point de chute. Les traits pleins représentent les sommets et les traits en pointillés représentent les creux de "la vague". (Voir figure 6.2). La vitesse de propagation est identique dans toutes les directions. En chacun des points, la direction de ces ondes circulaires est radiale, c'est-à-dire dirigée comme les rayons d'un cercle.

Deux crêtes consécutives sont distantes d'un longueur d'onde λ. (Voir figure 6.2). Plus les traits sont espacés, plus la longueur d'onde de l'onde est grande ou plus la fréquence de l'onde est petite. Tous les points d'une même circonférence sont à la même distance de

la source et sont donc atteints par la vibration au même instant. Ils sont dans le même état de vibration.

FIGURE 6.2 – Des gouttes d'eau qui tombent dans l'eau génèrent des ondes circulaires..

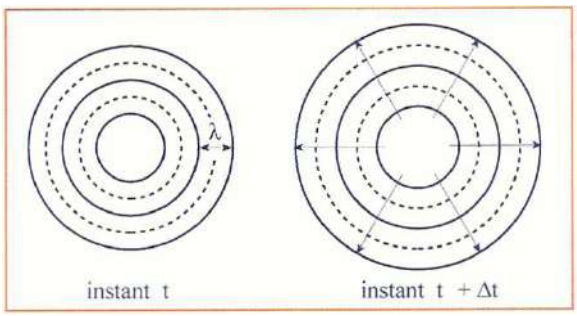


FIGURE 6.3 – Quelques ondes circulaires qui s'éloignent du centre. La vitesse de propagation est la même dans toutes les directions.

Ondes planes Remplaçons la pointe qui vibre par un vibreur rectiligne (tige horizontale), nous obtenons des *ondes planes* : leurs crêtes et creux sont rectilignes. La direction de propagation est perpendiculaire aux crêtes. Tant qu'aucun obstacle ne se trouve sur le chemin de l'onde, celle-ci se propage en ligne droite. La distance entre deux crêtes voisines est la longueur d'onde. (Voir figures 6.4 et 6.5).

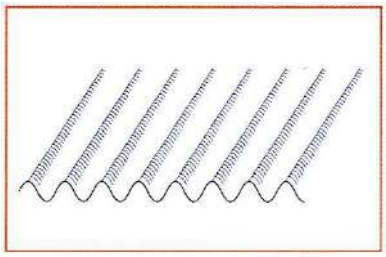


FIGURE 6.4 – Ondes planes produites par un vibreur rectiligne.

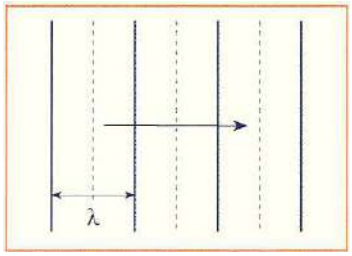


FIGURE 6.5 – Deux crêtes sont séparées par une longueur d'onde. La direction de propagation est perpendiculaire aux crêtes.

Conclusion Dans les deux cas, *les ondes se propagent en lignes droites*, car les perpendiculaires aux crêtes sont des droites.

Principe de Huygens

Le point S où la goutte vient de tomber a été dérangé de sa position d'équilibre et cette perturbation se communique de proche en proche aux autres points de la surface : S est une source d'ondes circulaires.

Huygens généralise cette propriété à tout point écarté de sa position d'équilibre. **Tout point atteint par l'onde se comporte comme une source d'ondes, c'est à dire que ce point génère de ondes élémentaires circulaires de même fréquence.**

FIGURE 6.6 – Christiaan Huygens (1er avril 1629 [La Haye] - 8 juillet 1695 [La Haye]) est un grand mathématicien et physicien hollandais du XVIIè siècle. Il invente de nouveaux procédés pour améliorer les lentilles des télescopes. Il découvre la première lune de Saturne. Il est le premier à avoir l'idée d'utiliser le mouvement du pendule pour fabriquer des horloges. En 1673, il publie, Horlogium Oscillatorum, où il explique comment fabriquer des horloges fonctionnant sur le principe du pendule. Il est le premier à s'intéresser à la dynamique des corps et plus seulement des particules. Un autre travail majeur est le Traité de la Lumière qu'il écrit en 1678. Huygens y développe des arguments en faveur de la théorie ondulatoire de la lumière, au moment où Newton défend l'idée que la lumière est de nature corpusculaire. Même si le modèle de Huygens permet d'expliquer de nombreux phénomènes optiques, l'immense popularité de Newton fait que ce travail sur la lumière sera quasiment ignoré.

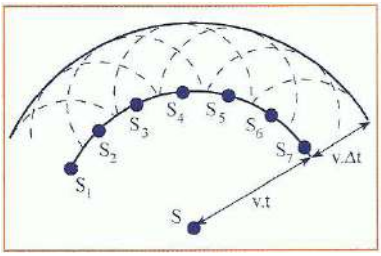


FIGURE 6.7 – Propagation d'une onde circulaire.

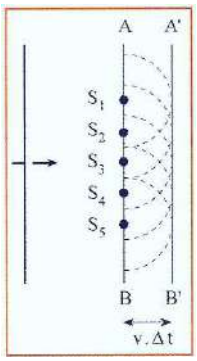


FIGURE 6.8 – Propagation d'une onde longitudinale.

Ainsi la perturbation partie de S (Voir figure 6.7) à l'instant $t = 0$, atteint, à l'instant t, tous les points de la conférence de rayon $v.t$; chacun de ces points, par exemple S_1, S_2, S_3, etc émet des ondes élémentaires circulaires qui, à l'instant $t+\Delta t$, ont parcouru la distance $v.\Delta t$. Ces ondes élémentaires ne sont pas visibles, mais leur enveloppe extérieure forme la ligne circulaire de rayon $v.t+v.\Delta t = v.(t+\Delta t)$: à l'instant $t+\Delta t$, la perturbation partie de S a atteint la circonférence de rayon $v.(t+\Delta t)$. Le principe de Huygens permet donc de prévoir qu'une onde circulaire va se propager en restant une onde circulaire.

De même pour une onde plane (Voir figure 6.8) : soit à l'instant t une perturbation formant le segment AB. Chacun des points S_1, S_2, S_3, etc de ce segment émet des ondes élémentaires circulaires, qui à l'instant $t+\Delta t$, ont parcouru la distance $v.\Delta t$ depuis l'instant

t. Leur enveloppe extérieure forme un segment $A'B'$ distant de $v.\Delta t$ du segment AB. Le principe de Huygens permet donc de prévoir qu'une onde plane se propage en restant une onde plane.

6.2 Réflexion des ondes

6.2.1 Expérience

Analysons le comportement de l'onde lorsqu'elle rencontre un obstacle qui arrête sa progression.

Réflexion : changement de direction que subit l'onde incidente lorsqu'elle rencontre un obstacle.

Ondes circulaires

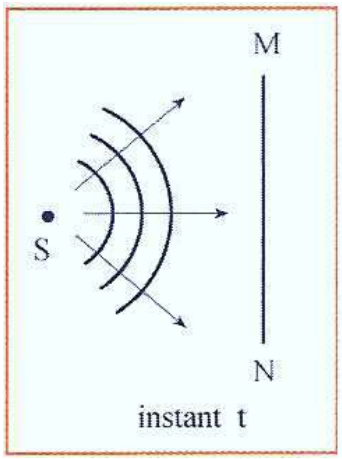


FIGURE 6.9 – Les ondes émisses de S sont circulaires.

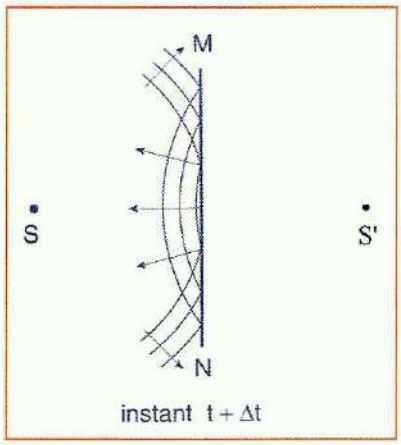


FIGURE 6.10 – Lorsque les ondes rencontrent l'obstacle MN, elles produisent des ondes réfléchies.

Prenons pour obstacle un corps rectiligne MN placé dans la cuve à ondes, et dépassant le niveau de l'eau. Laissons tomber une goutte d'eau en un point S situé à quelques centimètres de l'obstacle. (Voir figure 6.9). Nous observons (Voir figure 6.10) que les ondes circulaires rencontrent MN et produisent des *ondes réfléchies*. Leurs centre S' est le symétrique de S par rapport à l'obstacle. Nous constatons aussi que la longueur d'onde est inchangée après la réflexion.

Ondes planes

Disposons l'obstacle rectiligne MN obliquement par rapport à des ondes planes incidentes. (Voir figure 6.11). On observe des *ondes réfléchies planes*, de longueur d'onde inchangée ; seule la direction de propagation est modifiée. (Voir figure 6.12).

– *L'angle d'incidence* i est définit comme l'angle entre la direction de propagation des ondes incidentes et la normale (la perpendiculaire) à l'obstacle au point d'incidence.

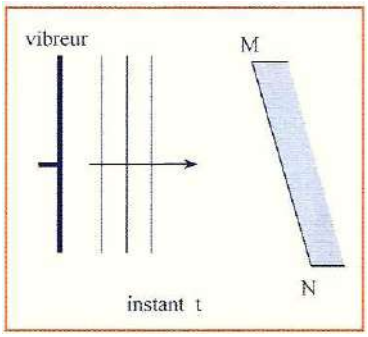


FIGURE 6.11 – Les ondes produites par le vibreur sont des ondes planes.

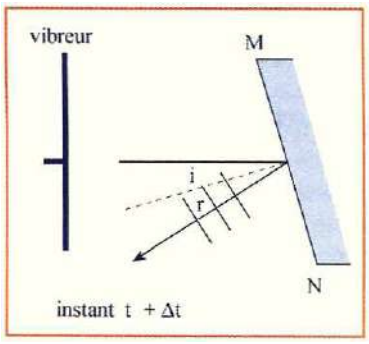


FIGURE 6.12 – Lorsque les ondes planes rencontrent l'obstacle MN, on observe des ondes réfléchies planes.

– *l'angle de réflexion* r est défini comme l'angle la direction de propagation dans ondes réfléchies et la normale à l'obstacle au point d'incidence.

Nous constatons que l'amplitude de i est égale à celle de r.

$$\boxed{i = r}$$

FIGURE 6.13 – (a) Réflexion d'une onde plane sur une surface. (b) Le son se réfléchit sur une surface issue de façon que l'angle d'incidence soit égal à l'angle de réflexion.

6.2.2 Démonstration de la loi de la réflexion

L'hypothèse d'Huygens est parfaite pour expliquer les phénomènes typiquement ondulatoires (ex : diffraction - voir plus loin). Nous allons montrer que nous pouvons effectivement retrouver les lois de la réflexion qui ont été vue en 4ème. [1]

Soit la figure 6.14. Considérons une onde plane p et soient I_1, I_2, I_3 trois directions parallèles à la direction de propagation de l'onde. Au moment où celle-ci atteint le point A du plan M, elle a progressé le long de I_2 et I_3. Conformément au principe d'Huygens, la particule A devient un centre de vibrations. Au bout de t secondes, temps que met

1. En 4ème, nous avons étudié l'optique géométrique qui a pour objet l'étude de la lumière selon les hypothèses dues à Newton : la lumière est assimilée à de très petites particules d'énergie qui se déplacent en ligne droite à très grande vitesse. Dans la seconde partie de ce cours, nous montrerons que la lumière est bien une onde. La démonstration donnée ici s'applique donc également au cas de la lumière.

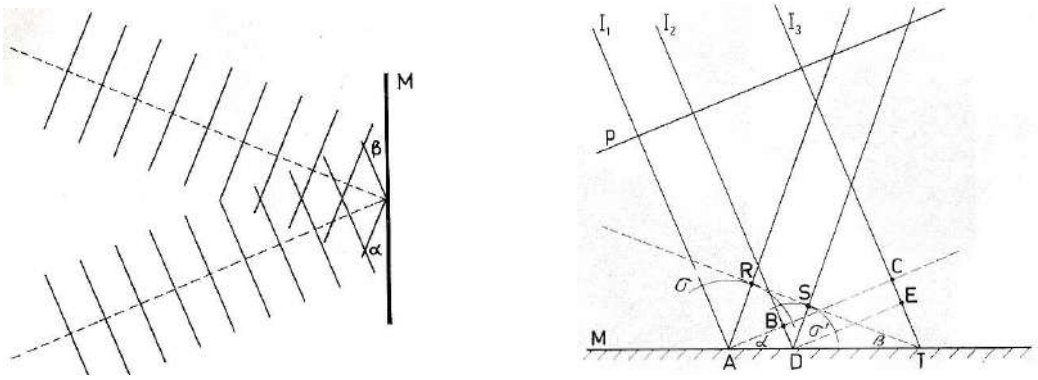


FIGURE 6.14 – (a) Réflexion d'une onde plane sur une surface. (b) Le son se réfléchit sur une surface issue de façon que l'angle d'incidence soit égal à l'angle de réflexion.

l'onde pour aller de C en T, celle qui émane de A s'avance jusqu'à une sphère σ de rayon : $AR = TC = v.t$; où v est la vitesse de l'onde. Lorsque la particule D est atteinte par l'onde, t' secondes après son passage en B, l'onde émanant de D, atteint au bout de $(t-t')$ seconde, la sphère σ' de rayon : $DS = v(t-t')$. Puisque les triangles ART et DST sont rectangles, il suffit de montrer que

$$\frac{TA}{TD} = \frac{AR}{DS}$$

pour prouver que les plans tangents TR et TS aux sphères σ et σ' sont confondus. Et il en est bien ainsi puisque :

$$\frac{TA}{TD} = \frac{TC}{TE} = \frac{vt}{v(t-t')} = \frac{t}{t-t'} \qquad \text{et} \qquad \frac{AR}{DS} = \frac{vt}{v(t-t')} = \frac{t}{t-t'}$$

Après réflexion, l'onde plane est donc parallèle à TR. Sa direction de propagation est parallèle à AR ou DS. C'est le **phénomène de réflexion**. Les triangles CAT et RTA sont égaux ; donc : $\alpha = \beta$. *Avant et après réflexion, l'onde plane présente donc la même inclinaison sur le plan.*

6.2.3 Conclusions

- Les ondes peuvent être réfléchies par des obstacles.
- La réflexion se passant dans le même milieu et sur un obstacle fixe, les ondes réfléchies ont la même longueur d'onde λ, la même vitesse V et la même fréquence f que l'onde incidente.
- L'angle d'incidence i (angle entre la direction de propagation de l'onde incidente et la normale au point d'incidence) et l'angle de réflexion r (idem pour l'onde réfléchie) sont égaux.

6.2.4 Applications

Rappelons que toutes les propriétés étudiées avec la cuve à ondes, sont également d'application avec toutes les autres types d'ondes. (Rappel : $V_{son} = 340$ m/s à 15°C)

L'écho

Un auditeur peut percevoir distinctement l'écho causé par la réflexion du son, à la condition suivante : il faut que l'intervalle de temps entre la perception du son émis et la perception du son réfléchi soit au moins de 0.1 s, sinon l'oreille ne peut pas distinguer les deux. L'onde sonore parcourt alors une distance totale qui vaut : $d = v.t = 340 \times 0.1 = 34$ m. La surface réfléchissante doit se trouver au moins à 17 m de la source.

Réflexion dans une salle

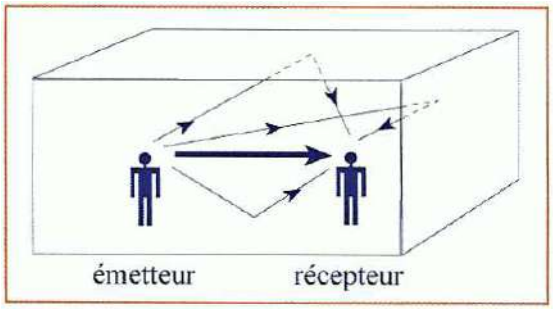


FIGURE 6.15 – Un auditeur reçoit plusieurs signaux sonores alors qu'il n'y a qu'un seul son émis.

FIGURE 6.16 – Chambre sourde de la Polytech à Mons. Les murs sont couverts de matériau absorbant. La forme en pyramide permet d'augmenter la surface d'absorption du son.

Une onde sonore est plus ou moins réfléchie par les surfaces qu'elle rencontre ; tout dépend de la nature de cette surface. Par exemple, une salle vide de tout mobilier (Voir figure 6.15), sans tapis ni tentures, est ressentie comme "sonore", car les sons sont assez bien réfléchis par les murs, le sol, etc, et l'auditeur perçoit plusieurs signaux sonores alors qu'il n'y a qu'un seul son émis (à condition que les parois soient plutôt lisses et non pas irrégulières).

Dans une salle d'enregistrement ou de spectacles, on évite les réflexions en tapissant les murs avec des matériaux " brisés ", non plats (Voir figure 6.16). Dans un théâtre ou une salle de concert, l'architecte déterminera la disposition des lieux et choisira avec soin les matériaux afin de minimiser les phénomènes de réflexion.

Le sonar

La fréquence utilisée par le sonar (**S**ound **N**avigation **a**nd **R**anging) est de plusieurs kilohertz ; il n'émet pas en continu mais pas brèves impulsions. (Voir figure 6.17) Lorsque l'onde sonore rencontre un obstacle (banc de poissons, sous-marin, etc), elle est réfléchie et reçue par un appareil d'écoute. L'intervalle de temps qui s'écoule entre l'émission et la réception du signal permet de calculer la distance à laquelle se trouve l'obstacle.

L'échographie

L'échographie est un moyen d'investigation médicale non traumatisant pour le patient et permet d'émettre ou de confirmer certains diagnostics. Cette méthode est basée sur le

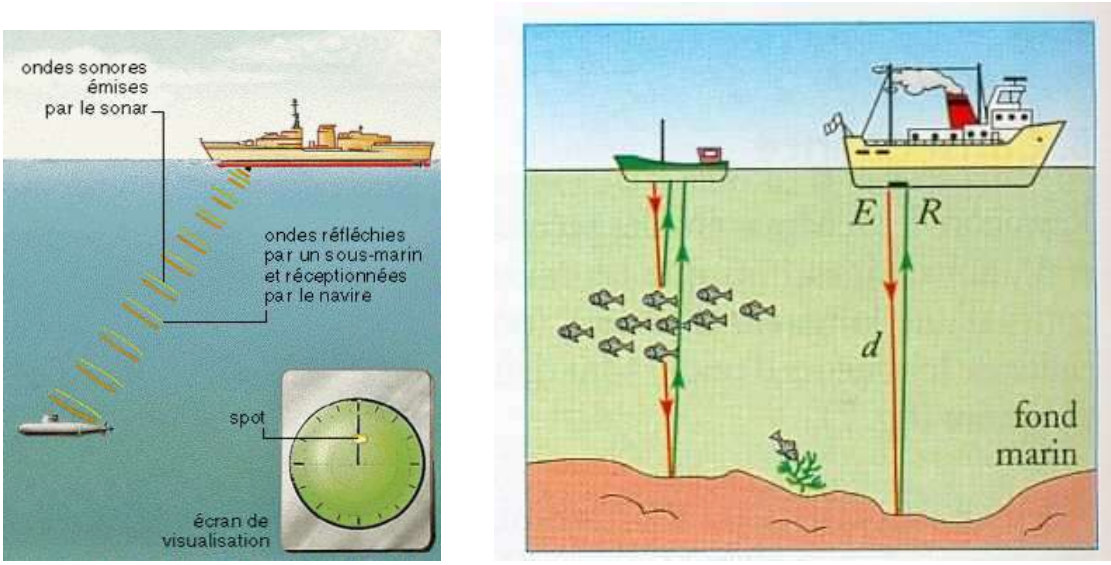


FIGURE 6.17 – Les sonars sont largement utilisés dans la marine. Le bateau en surface envoi des impulsions sonores qui vont se réfléchir sur différents obstacles. On peut ainsi détecter un sous-marin, des bancs de poissons, ou simplement cartographier les fonds marins.

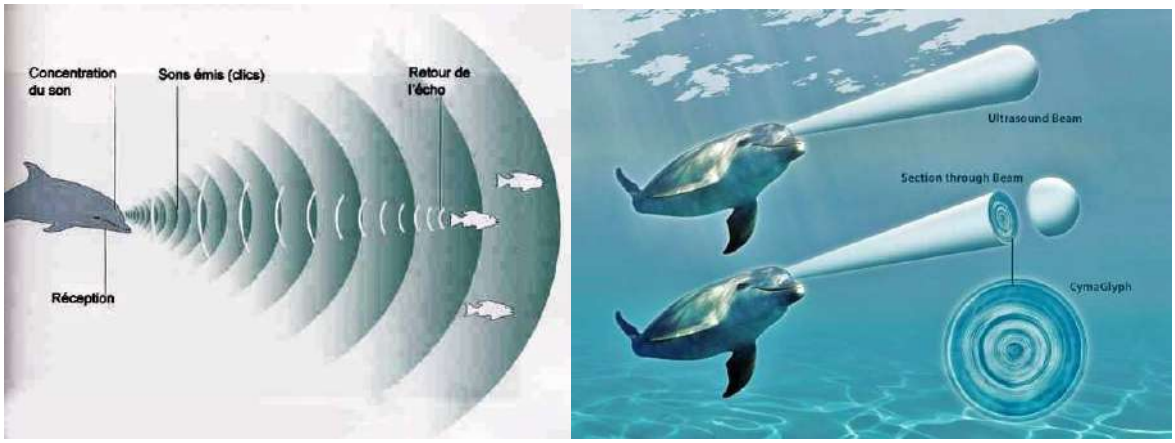


FIGURE 6.18 – De nombreux animaux marins utilisent le sonar. En particulier les cétacés. Leur bosse frontale constitue une caisse de résonance qui permet d'amplifier et de focaliser le faisceau sonore. Les ondes réfléchies sont détectées par les os de la mâchoire et les informations sont envoyés au cerveau. Plusieurs campagnes de sensibilisation ont été faites pour mettre en exergue que les sonars très (trop !) puissants utilisés par les militaires provoqueraient de graves perturbations dans le système des cétacés et pourraient être une des raisons des échouages de cétacés désorientés sur les plages.

fait que les ultrasons se réfléchissent de façon plus ou moins importantes selon la nature (plus exactement l'impédance [2]) des milieux rencontrés. L'émetteur-récepteur d'ultrasons

2. Impédance : Substantif féminin. Emprunté de l'anglais impedance, de même sens, dérivé de to impede, « retarder », lui-même dérivé du latin impedire, « entraver ». En *physique* : Inertie opposée par un système ou par un milieu au passage d'un phénomène périodique. Impédance acoustique. En *électricité* Grandeur spécifique utilisée pour calculer la résistance apparente des circuits en courant alternatif. L'impédance électrique se mesure en ohms.

FIGURE 6.19 – La chauve-souris possède un sonar très perfectionné et peut produire des ultrasons allant jusque 200 000 Hz. Le sonar permet à la chauve-souris de se guider et de détecter les insectes dont elle se nourrit. Malgré sa très injuste mauvaise réputation, la chauve-souris est un insectivore particulièrement utile. Elle est aujourd'hui fortement menacés et il est impératif de protéger son habitat.

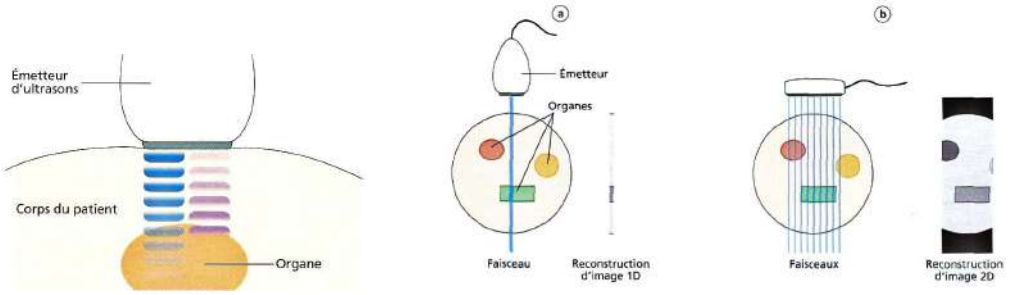


FIGURE 6.20 – A gauche : Une onde incidente est partiellement réfléchie à la frontière entre deux milieux d'impédances différentes. L'onde ultrasonore s'atténue par ailleurs au fur et à mesure de sa progression dans le milieu. A droite : Principe de création d'une image par échographie (a) Une intensité relative (un niveau de gris) est associés à chaque point, en fonction de l'amplitude de l'écho détecté dans une direction donnée. (b) Pour obtenir une image bidimensionnelle, plusieurs faisceaux sont envoyés simultanément.

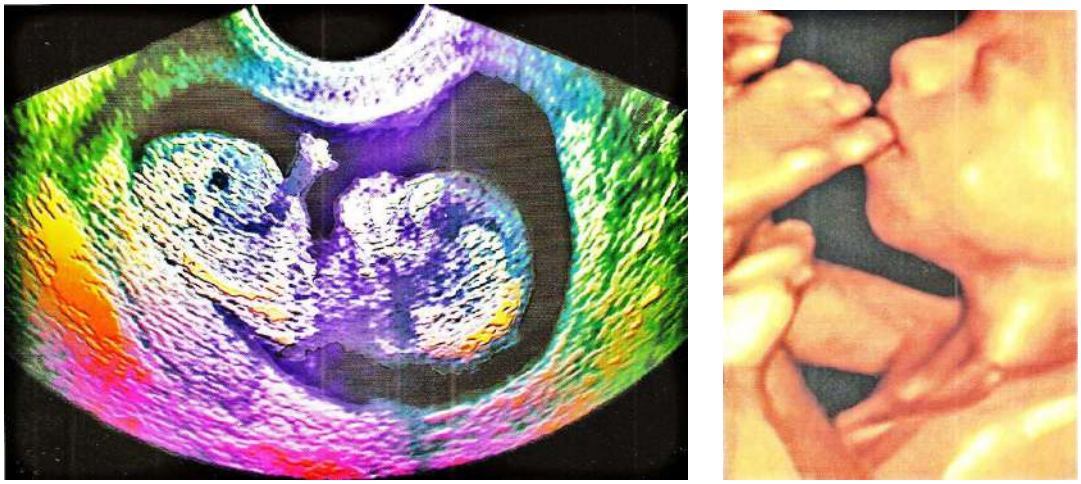


FIGURE 6.21 – a) Echographie d'un foetus de 6 mois. (b) Image en 3D d'un foetus.

(de fréquence quelques MHz) est placé en contact étroit avec la peau (Voir figure 6.20) : un gel est utilisé pour éviter une réflexion presque totale à la frontière air-peau. L'émetteur produit des ondes pendant une courte durée (quelques μs ensuite le récepteur détecte (pendant 250 μs les éventuelles ondes réfléchies. En effet, chaque fois que ce faisceau ultrasonique rencontre une frontière entre deux tissus différents, il se réfléchit partiellement. La partie non réfléchies continue son chemin, et peut-être réfléchie plus loin. Les différents échos, d'autant plus retardés qu'ils ont été produits par des couches profondes sont transformés en signaux électrique et ensuite visualisé sur un écran de contrôle.

6.3 Réfraction des ondes

6.3.1 Expérience préliminaire

Observations

FIGURE 6.22 – (a) Cuve à ondes légèrement inclinée. (b) La propagation des ondes ne se fait plus selon des cercles concentriques.

Montrons que la vitesse de propagation des ondes à la surface de l'eau dépend de la profondeur. Inclinons légèrement la cuve : l'épaisseur d'eau n'est donc plus uniforme. Faisons tomber une goutte d'eau en un point S. Les déformations de la surface ne sont plus des cercles de centre S. La distance parcourue en une même durée est plus petite là où la profondeur est la plus faible.

Conclusion

La vitesse de propagation de l'onde à la surface de l'eau est plus petite lorsque la profondeur h de l'eau est plus faible. Ce phénomène est à l'origine du caractère catastrophique des tsunamis. (Voir figure 6.27).

6.3.2 Expérience de réfraction

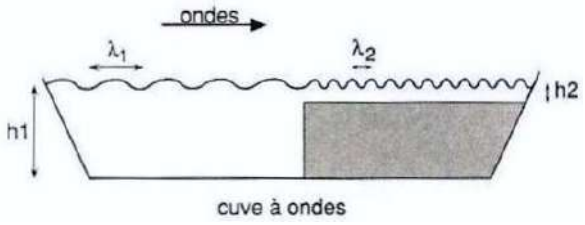


FIGURE 6.23 – La vitesse de propagation dépend de la profondeur. $h_1 > h_2 \Rightarrow v_1 > v_2$.

Mettons la cuve à l'horizontale. Pour créer deux milieux dans lesquels la vitesse de propagation est différente, il suffit d'avoir deux zones où la hauteur d'eau est différente. (Voir figure 6.23).

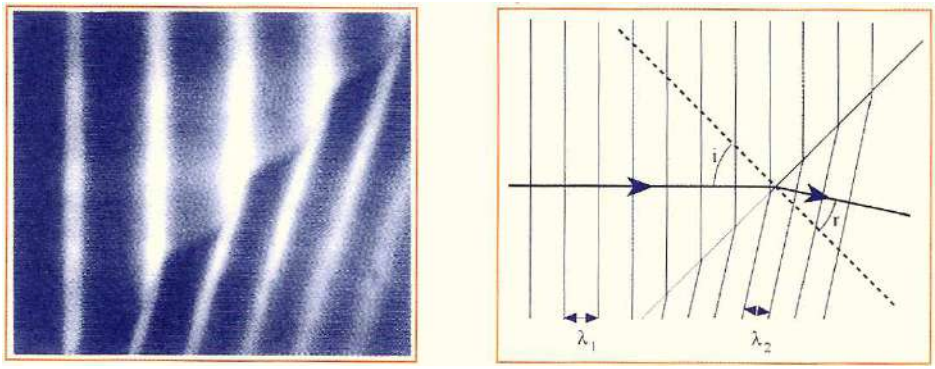


FIGURE 6.24 – Lorsque des ondes arrivent obliquement à la surface de séparation entre deux milieux où les vitesses de propagation seront différentes, l'onde change de direction. C'est le phénomène de réfraction.

Si nous envoyons obliquement des ondes planes vers le second milieu, nous observons que (Voir figure 6.24) :

- Dans le second milieu, les crêtes sont plus serrées.
- La direction de propagation a changé. Elle s'est rapprochée de la normale. Il y a eu **réfraction**.
- Attention, on notera soigneusement que *la fréquence de l'onde reste inchangée*. Dès lors la relation $\lambda = \frac{v}{f}$ explique que si v diminue alors f diminue aussi.

Nous définirons :

- **L'angle d'incidence** i, comme étant l'angle formé par la direction de propagation des ondes incidentes et la normale à la ligne de séparation des deux milieux.
- **L'angle de réfraction**, comme étant l'angle formé par la direction de propagation des ondes réfractées et la normale à la ligne de séparation des deux milieux..

6.3.3 Démonstration de la loi de la réfraction

Considérons une onde plane p et soient I_1, I_2 et I_3, trois directions de propagation de l'onde dans le milieu (1). Soient v_1 et v_2 les vitesses de l'onde respectivement dans les milieux (1) et (2). Au moment où l'onde plane atteint le point A de la surface de séparation des deux milieux, elle a progressé le long de I_2 et I_3, jusqu'en B et C. Conformément au principe d'Huygens, la particule A devient un centre de vibrations. Au bout de t seconde, temps que met l'onde pour aller de C en T, celle émanant de A s'avance jusqu'à une sphère σ de rayons $AR = v_2 t$. Lorsque l'onde partant de B atteint la particule D, t' secondes après son passage en B, l'onde qui émane de D atteint, au bout de $(t - t')$ secondes, la sphère σ' de rayon $DS = v_2(t - t')$. Puisque les triangles ART et DST sont rectangles, il suffit de montrer : $\dfrac{TA}{TD} = \dfrac{AR}{DS}$. Ce qui est le cas puisque après son passage en B, l'onde qui émane de D atteint, au bout de $(t-t')$ secondes, la sphère σ' de rayon $DS = v_2(t-t')$. Puisque les triangles ART et DST sont rectangles, il suffit de montrer : $\dfrac{TA}{TD} = \dfrac{AR}{DS}$. Ce

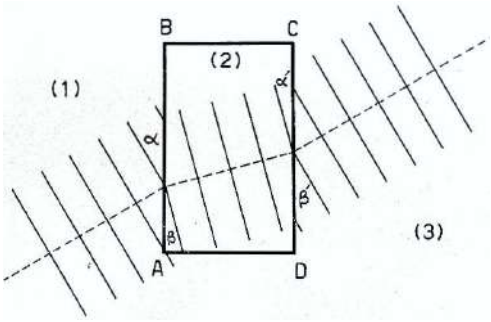


FIGURE 6.25 – Une onde incidente se propageant dans le milieu (1) arrive dans un milieu (2). L'onde se réfracte et la direction de propagation se rapproche de la normale. A la frontière entre le milieu (2) et (3) l'onde se réfracte de nouveau. Si les milieux (1) et (3) sont les mêmes alors les directions de propagation dans les milieux (1) et (3) seront parallèles.

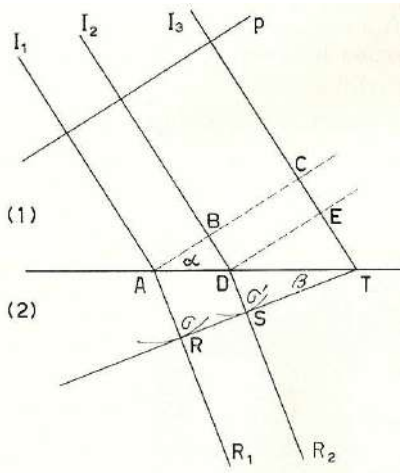


FIGURE 6.26 – Explication théorique du phénomène de propagation.

qui est le cas puisque :

$$\frac{TA}{TD} = \frac{TC}{TE} = \frac{v_1 t}{v_1 (t - t')} = \frac{t}{t - t'} \qquad \text{et} \qquad \frac{AR}{DS} = \frac{v_2 t}{v_2 (t - t')} = \frac{t}{t - t'}$$

Dans le milieu (2), l'onde réfractée est donc parallèle à la droite TR, la direction I_1 prend dans le milieu (2), la direction R_1, perpendiculaire à l'onde réfractée et I_2, la direction R_2 également perpendiculaire à l'onde plane. c'est le phénomène de réfraction des ondes. De plus, on a :

$$\begin{cases} CT = v_1 t = AT \sin\alpha \Rightarrow AT = \dfrac{v_1 t}{\sin\alpha} \\ AR = v_2 t = AT \sin\beta \Rightarrow AT = \dfrac{v_2 t}{\sin\beta} \end{cases} \Rightarrow \frac{v_1 t}{\sin\alpha} = \frac{v_2 t}{\sin\beta} \Rightarrow \sin\alpha = \frac{v_1}{v_2} \sin\beta \Rightarrow \boxed{\sin\alpha = n_{12} \sin\beta}$$

Ce qui est la loi de Snell-Descartes pour la réfraction. n_{12} est l'indice de réfraction du milieu (1) par rapport au milieu (2).

6.3.4 Conclusions

a Lorsque des ondes passent d'un milieu dans un autre, et que leur vitesse de propagation v_2 est différente de celle v_1 dans le premier milieu, alors il y a **réfraction**, c'est-à-dire changement de la direction de propagation.

b

- Si $v_1 > v_2$, alors $i > r$: la direction de propagation se *rapproche* de la normale à la surface de séparation des deux milieux.
- Si $v_1 < v_2$, alors $i < r$: la direction de propagation se *rapproche* de la normale.

Dans les deux cas,

$$\boxed{\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}} \tag{6.1}$$

6.3.5 Applications

Les tsunamis

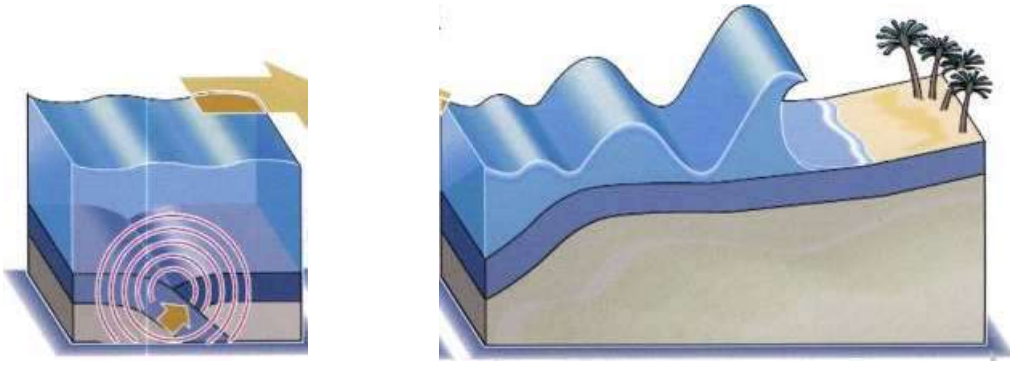


FIGURE 6.27 – *En pleine mer* : Cette vague se déplace à des vitesses comprises entre 500 et 800 km/h. Elle est en général suivi de plusieurs autre vagues - des répliques - tout aussi meurtrières. *En eau peu profonde* : A l'approche des côtes, cette vague perd en vitesse mais gagne en amplitude et forme un mur d'eau qui peut dépasser 30 mètres de hauteur.

Le raz-de-marrée (ou tsunami en japonais[3]) est provoqué à l'origine par un séisme. A Sumatra, ce tremblement de terre est le fruit de l'affrontement de deux plaques tectoniques dont l'une passe sous l'autre (subduction). A cette occasion, un large morceau de l'écorce terrestre s'effondre et se déplace, mettant en mouvement la colonne d'eau qui est au-dessus, ce qui provoque la formation d'une série de vagues imposantes, un peu comme un caillou lancé dans une marre. (Voir figure 6.27). Le 26 décembre 2004 le tsunami qui a ravagé les côtes du Sud Est Asiatique a fait plus de deux cents mille morts. L'onde provoquée par un séisme s'est propagé à plus de 800 km/h, mais en atteignant les côtes, sa vitesse diminua, puisque la profondeur de l'eau à ces endroits diminue. L'énergie cinétique se transforma alors en partie en énergie potentielle, en créant des vagues gigantesques. De plus, lorsque l'amplitude du tsunami devient non négligeable par rapport à la profondeur de l'eau, une partie de la vitesse d'oscillation de l'eau se transforme en un mouvement horizontal global, appelé courant de Stokes. Sur les côtes, c'est davantage ce mouvement horizontal et rapide (typiquement plusieurs dizaines de km/h) qui est la cause des dégâts que l'élévation du niveau de l'eau.

La figure 6.28 donne quelques indications sur la relation profondeur de l'eau, vitesse de l'onde et longueur d'onde. Le lecteur vérifiera grâce à ce tableau que la fréquence de l'onde reste approximativement constante.

3. En japonais, "tsu" signifie "port" et "nami" signifie "vague".

Profondeur (m)	Vitesse (km/h)	longueur d'onde (m)
7000	943	282
4000	713	213
2000	504	151
200	159	48
50	79	23
10	35	10.6

FIGURE 6.28 – Valeurs typiques entre profondeur de l'eau, vitesse de l'onde et longueur d'onde

Exemple . Il est possible de donner une estimation de la hauteur des vagues provoquées par un tsunami. Considérons un séisme à 4000 m de profondeur qui provoque en des ondes d'amplitude un mètre. En admettant qu'il n'y ait pas de perte d'énergie, estimer l'amplitude des vagues sur une plage de 10 m de profondeur.

Solution Considérons une colonne d'eau de hauteur 4000 m et d'aire à la base de $S = 1$ m^2 située juste au-dessus de l'endroit où se produit le séisme. Cette colonne constitue un oscillateur dont nous pouvons estimer l'énergie.

$$E = \pi^2 f^2 A_1^2 m$$

m est la masse d'eau de la colonne d'eau mise en mouvement. Si ρ est la masse volumique de l'eau et h_1 la hauteur de cette colonne, alors :

$$m = \rho h_1 S$$

$$\Rightarrow E = \pi^2 f^2 A_1^2 \rho h_1 S$$

Arrivé sur la plage où la profondeur est h_2 :

$$E = \pi^2 f^2 A_2^2 \rho h_2 S$$

Dès lors :

$$\pi^2 f^2 A_2^2 \rho h_2 S = \pi^2 f^2 A_1^2 \rho h_1 S$$

$$\Rightarrow A_2 = A_1 \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} = 2 \times \sqrt{\frac{4000}{10}} = 20 \text{ m}$$

Ce qui semble assez réaliste mais du côté haut. En effet, il n'y a des pertes d'énergie, et en eau très peu profondes d'autres phénomènes rentrent en jeu comme les courants de Stokes mentionnés ci-dessus. Finalement, une bonne approximation sera la moitié de la valeur théorique calculée, c'est-à-dire 10 m.

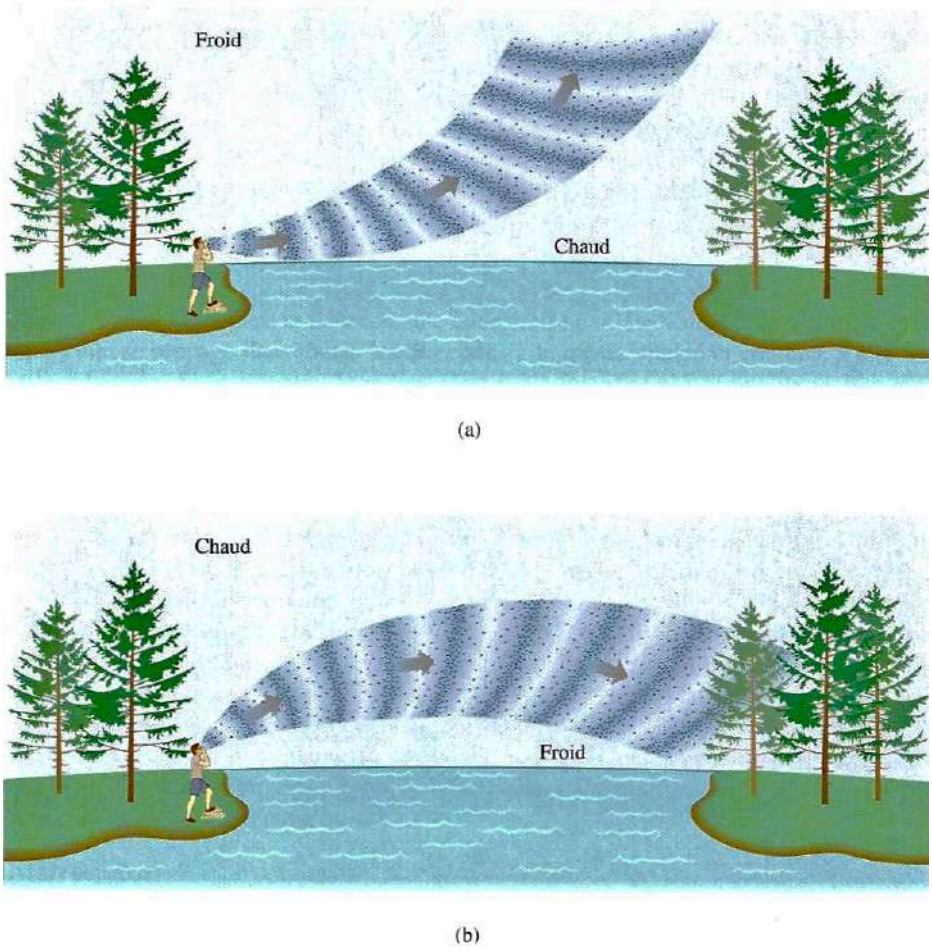


FIGURE 6.29 – La vitesse du son est plus grande dans l'air chaud et sa longueur d'onde est plus grande, ce qui crée une courbure du front d'onde. Sur ce principe, on a conçu des lentilles qui changent la forme des ondes sonores.

Propagation du son dans l'air

On sait que le son se propage plus loin la nuit que le jour. Pourquoi cette différence ? *Durant la journée*, la température de l'air diminue quand on s'élève. Or la vitesse du son diminue quand la température diminue. Lorsque la vitesse de l'onde diminue, l'onde se rétracte de telle sorte que l'angle r de l'onde réfractée soit inférieur à l'angle i de l'onde incidente. Le phénomène se répète de couche en couche et l'onde sonore s'écarte du sol (Voir figure 6.29). *Durant la nuit*, le phénomène inverse se passe. La température de l'air augmente quand on s'élève. En effet, le sol se refroidit plus vite que l'atmosphère. La vitesse de l'onde réfractée est plus grande et l'angle r est plus grand que l'angle i. De couche en couche, l'angle i augmente et par conséquent l'angle r. A ce moment donné, il y a réflexion totale, l'onde se rapproche du sol et le son porte plus loin. C'est pour cette raison que lors d'un orage (au-delà de 20 km), si l'air est plus chaud au niveau du sol, on peut voir l'éclair sans jamais entendre le tonnerre. Le foyer de l'orage se situe souvent vers 4 km d'altitude et le son au lieu de se diriger vers le sol, grimpe lentement vers le haut et

n'atteint jamais un observateur lointain situé sur la terre.

Les ondes sismiques

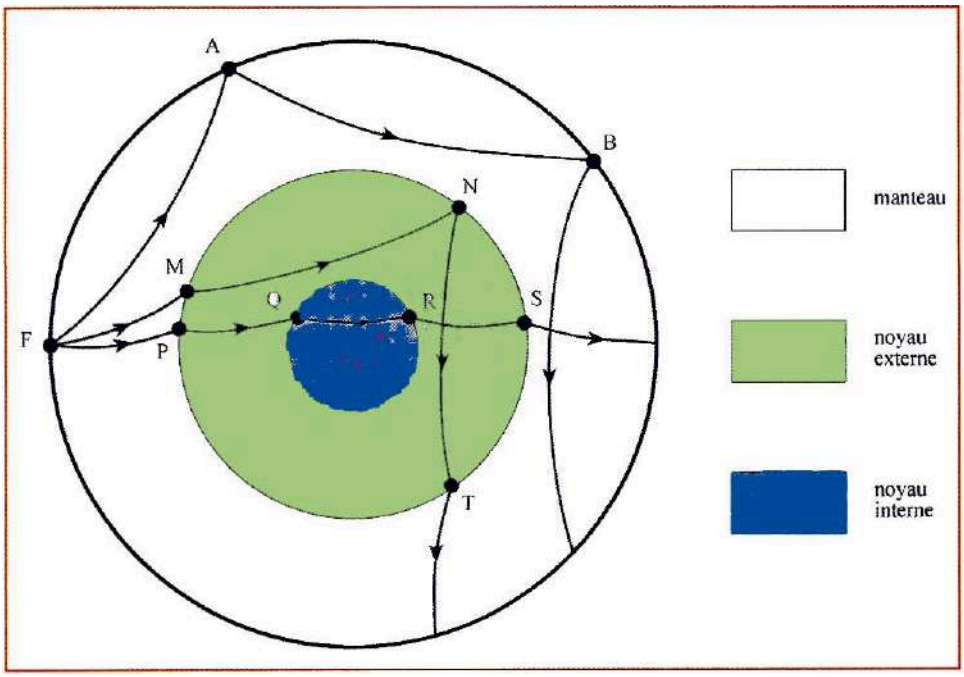


FIGURE 6.30 – Quelques trajets suivis par les ondes sismiques.

La propagation des ondes sismiques à travers la globe terrestre illustre les mêmes phénomènes que ceux observés à la cuve à ondes. La figure 6.30 présente quelques parcours d'ondes sismiques partant du foyer F. On y voit :

- des réflexions qui ont lieu à la surface (points A et B, ou à la transition entre deux milieux (point N) ;
- des réfractions brusques lors qu passage d'un milieu dans un autre (Points M, P, Q, R, S et T) ;
- des trajets non rectilignes alors qu'il s'agit de trajets dans un même milieu (par exemple FM, FA, AB, MN, etc. Mais il s'agit de milieux dont la masse volumique n'est pas constante : à plus grand profondeur, la masse volumique des roches est plus grande à cause de la pression croissante. Or la vitesse de propagation des ondes sismiques (quelques km/s) dépend de la masse volumique. La vitesse de propagation change donc continuellement tout au long du trajet, et il y a ainsi une réfraction, déviation tout au long du trajet.

Lecture : Complément sur les ondes sismiques

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques qui peuvent traverser un milieu sans le modifier. L'impulsion de départ va "entamer" les particules élémentaires présentes dans le milieu, qui vont "pousser" d'autres particules avant de reprendre leur place, se propageant suivant une réaction en chaîne.

Les vibrations lors d'un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue deux types d'ondes, les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent à sa surface. Sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou se superposent. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques qu'elles traversent, c'est pourquoi, les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et, d'une manière générale, cette dernière augmente avec la profondeur car le matériau traversé devient plus dense .

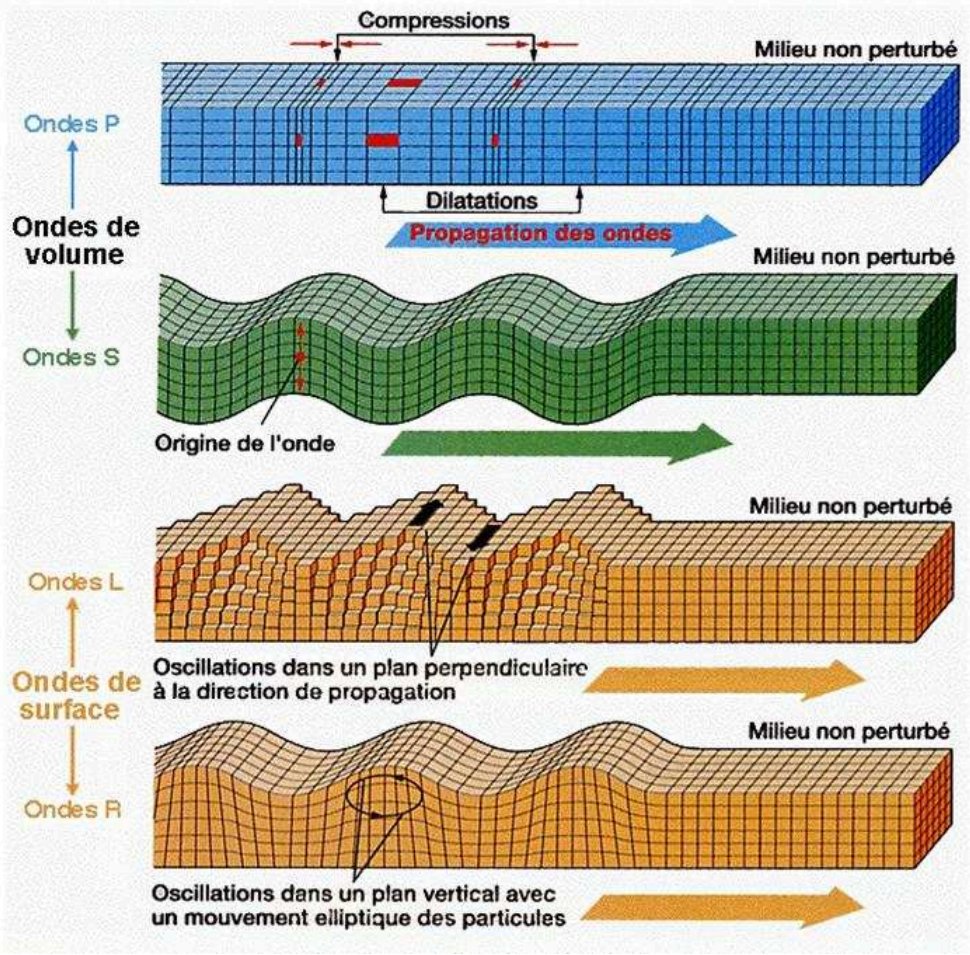


FIGURE 6.31 – Les différents types d'ondes sismiques : (a) les ondes P qui sont des ondes de compression, ou ondes longitudinales ; (b) les ondes S qui sont des ondes transversales ; (c) les ondes L qui sont aussi des ondes transversales ; (d) les ondes R qui sont des ondes d'un type particulier.

56+

Ondes de volume On distingue :

– les ondes P ou ondes primaires appelées aussi ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations

et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde. Ce sont les plus rapides (6 km/s près de la surface) et donc les premières à être enregistrées sur les sismogrammes. Elles sont responsables du grondement sourd que l'on peut entendre au début d'un tremblement de terre.

– les ondes S ou ondes secondaires appelées aussi ondes de cisaillement ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau externe de la Terre. Leur vitesse est de 4,06 km/s. Elles apparaissent en second sur les sismogrammes.

La différence des temps d'arrivée des ondes P et S suffit, connaissant leur vitesse, à donner une indication sur l'éloignement du séisme. On peut ainsi localiser son épicentre à l'aide de trois sismogrammes.

Les ondes de volume se propagent comme toutes les ondes, et en particulier comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, au passage manteau-noyau par exemple. Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur de la Terre. Leur temps de parcours dépend de ce trajet, elles n'arrivent pas toutes en même temps au même endroit.

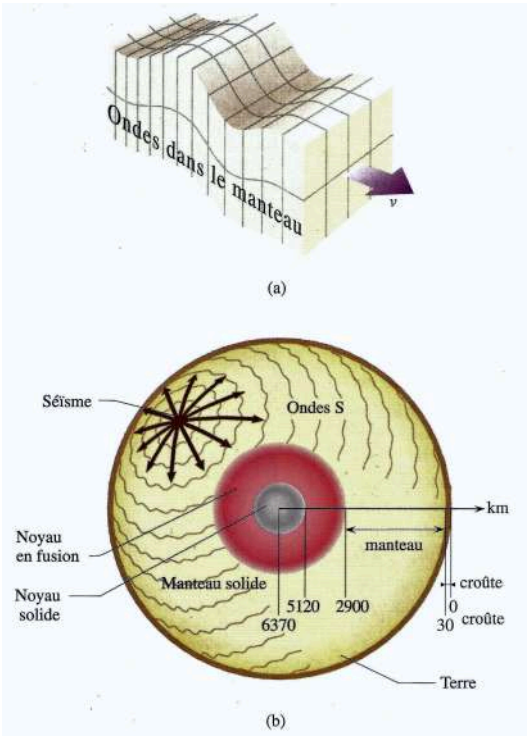


FIGURE 6.32 – (a) Les ondes sismiques transversales, comme celles représentées ici, sont appelées ondes secondaires ou ondes de cisaillement. (b) Le noyau de la Terre étant en fusion, il ne peut être le siège de telles ondes. L'onde S produite par le tremblement d'un point de la planète est ressentie partout sauf aux antipodes. Les ondes S se propagent dans la manteau à une vitesse proche de 8 km/s.

Ondes de surface On peut distinguer :

– L'onde L (onde de Love) : c'est un anglais Augustus Edward Hough Love qui a découvert son existence en 1911. Son déplacement est comparable à celui des ondes S sans le mouvement vertical. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations d'un édifice qui n'est pas une construction parasismique. Les ondes de Love se propagent à environ 4 km/s

– L'onde R (onde de Rayleigh) : elle a été découverte par John William Strutt Rayleigh en 1885. Son déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, constituant un mouvement à la fois horizontal et vertical.

6.4 La diffraction des ondes

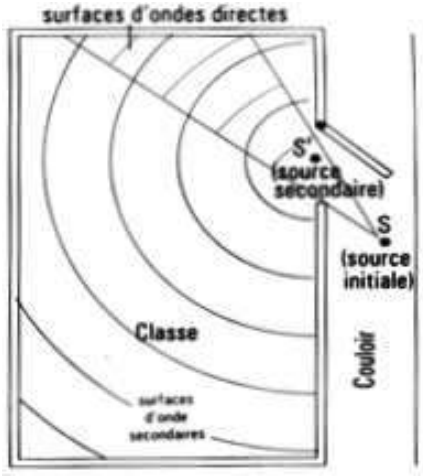


FIGURE 6.33 – Tant qu'une onde ne change pas de milieu ou ne rencontre pas d'obstacle, elle se propage en ligne droite. Que se passe-t-il lorsqu'elle passe près d'obstacle ? Nous entendons facilement au milieu de la classe, des bruits venant du couloir lorsque la porte est ouverte. De même, nous percevons très bien des bruits provenant de l'extérieur et ce par une fenêtre ouverte. Une onde ne devrait-elle pas être arrêtée par un obstacle ?

6.4.1 Expériences

Utilisons la cuve à ondes. Sur les photos suivantes, les ondes se propagent de bas en haut. (Voir figure 6.34).

Passage près du bord d'un obstacle

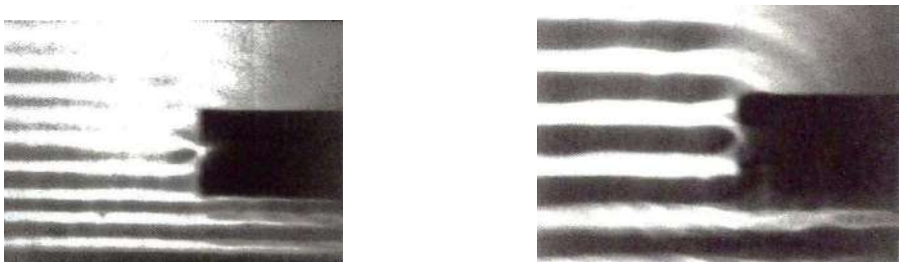


FIGURE 6.34 – (a) Lorsque λ est beaucoup plus petite que la largeur de l'obstacle, l'onde continue en ligne droite et derrière l'objet, on perçoit très peu d'onde diffractée. (b) Lorsque λ est égale ou supérieure aux dimensions de l'objet, il y a beaucoup de diffraction derrière l'obstacle.

– Si la longueur d'onde λ est petite, nous constatons que les ondes qui passent à côté d' obstacle continuent en ligne droite et que derrière l'obstacle il n'y a pratiquement pas d'ondes.
– Si la longueur d'onde λ est grande, nous constatons l'apparition, derrière l'obstacle, d'ondes en forme de quarts de cercle. Une partie de l'onde incidente est déviée, elle est **diffractée.**

Passage à travers une fente

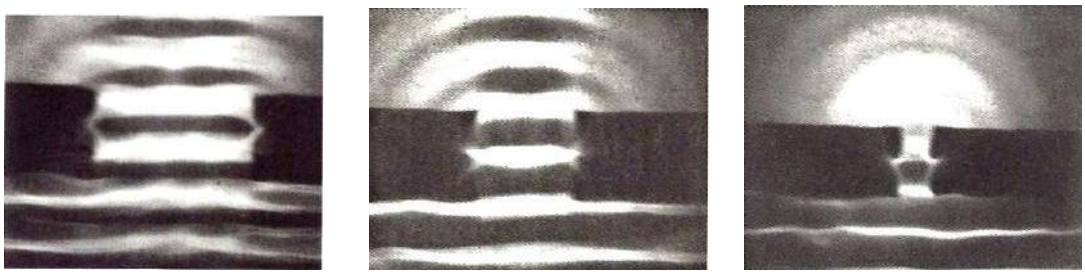


FIGURE 6.35 – (a) Si λ est petite (par rapport aux dimensions de la fente), il y a peu de diffraction ; (b) Plus λ augmente, plus on observe des ondes derrière l'objet ;(c) Si λ est grande (par rapport aux dimensions de la fente), il y a beaucoup de diffraction.

Envoyons des ondes rectilignes vers deux obstacles délimitant ainsi une fente. (Voir figure 6.35).

- Si la largeur de la fente est beaucoup plus grande que la longueur d'onde λ, alors au-delà de la fente, il y a des ondes rectilignes de même largeur que la fente qui continuent en ligne droite. Il y a peu (ou pas) d'ondes diffractées derrière les obstacles.
- Si la largeur de la fente diminue alors il y a diffraction. Plus la largeur de la fente diminue, plus il y a de diffraction.
- Si la largeur de la fente devient comparable ou plus petite que la longueur λ, alors nous observons des ondes semi-circulaires dont la fente est le centre. La fente se comporte comme une source ponctuelle.

Passage de part et d'autre d'un objet

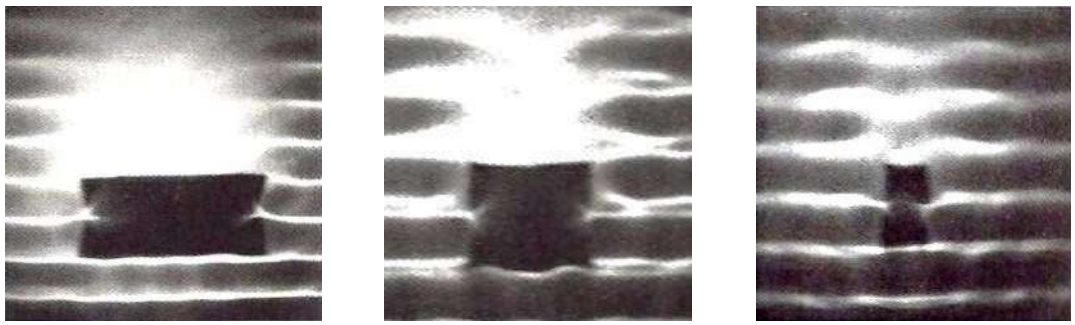


FIGURE 6.36 – (a) Si l'obstacle est grand par rapport à λ, il y a peu de diffraction ; (b) Plus la dimension de l'obstacle diminue, plus on observe des ondes derrière l'objet ;(c) Si l'obstacle est petit par rapport aux dimensions de λ, il y a très peu de diffraction. L'objet devient transparent pour l'onde.

Envoyons des ondes rectilignes vers un obstacle de largeur L.(Voir figure 6.36).

- Si L est très supérieure à la longueur d'onde λ, les ondes passent à côté de l'objet sans être déviées et derrière l'obstacle il y a peu ou pas d'ondes.
- Si L diminue, il y a de plus en plus d'ondes réfractées.

– Si L devient comparable ou inférieure à la longueur d'onde, alors à quelque distance derrière l'obstacle, les crêtes se reforment pratiquement comme si l'objet n'existait pas. L'objet est devenu transparent pour les ondes.

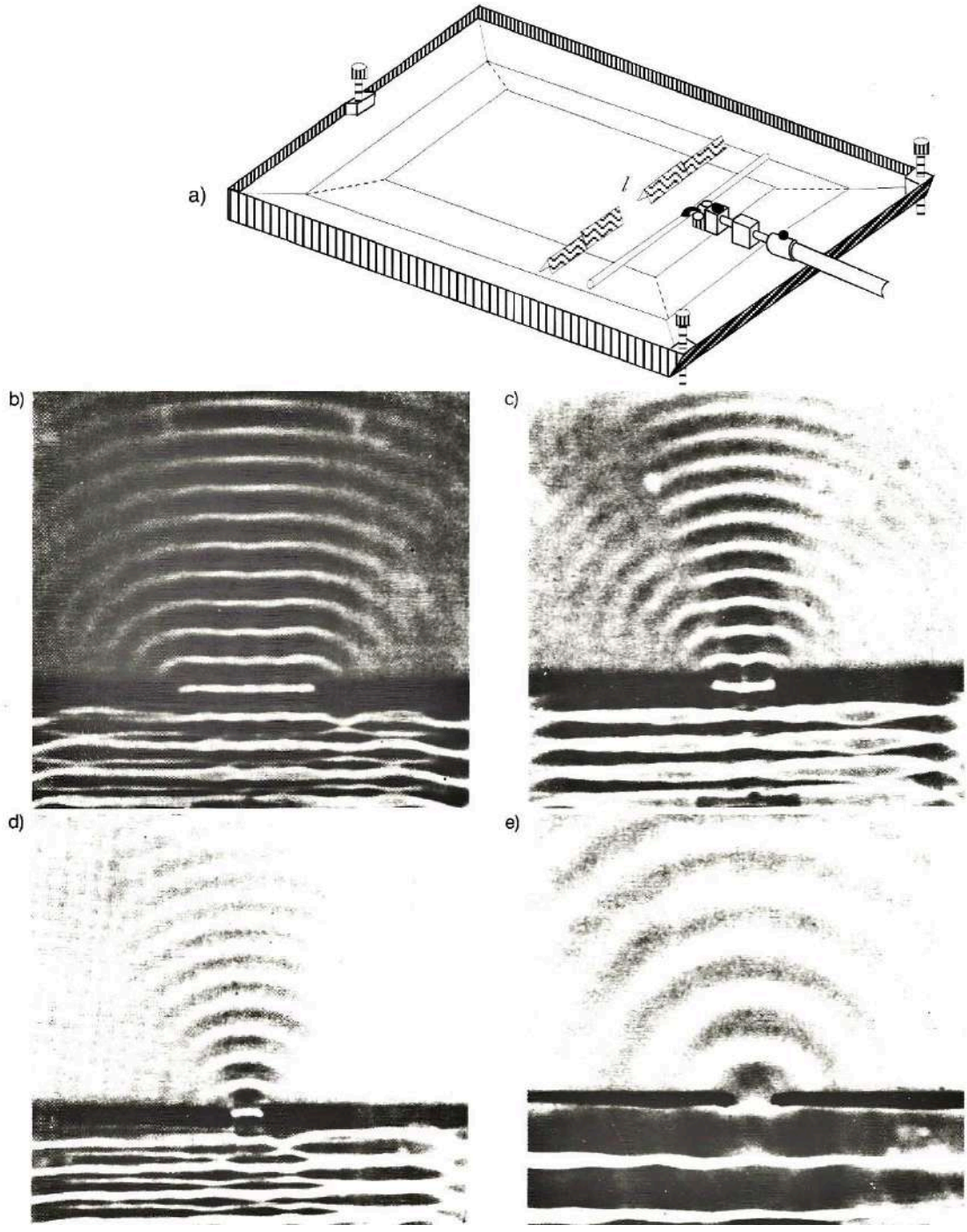


FIGURE 6.37 – Production d'une onde plane à la surface de l'eau contenue dans une cuve et diffraction de largeur l variable. (a) Dispositif expérimental ; (b) $l = 5\lambda$; (c) $l = 2\lambda$; (d) $l = \lambda$; (e) $l = \frac{\lambda}{2}$.

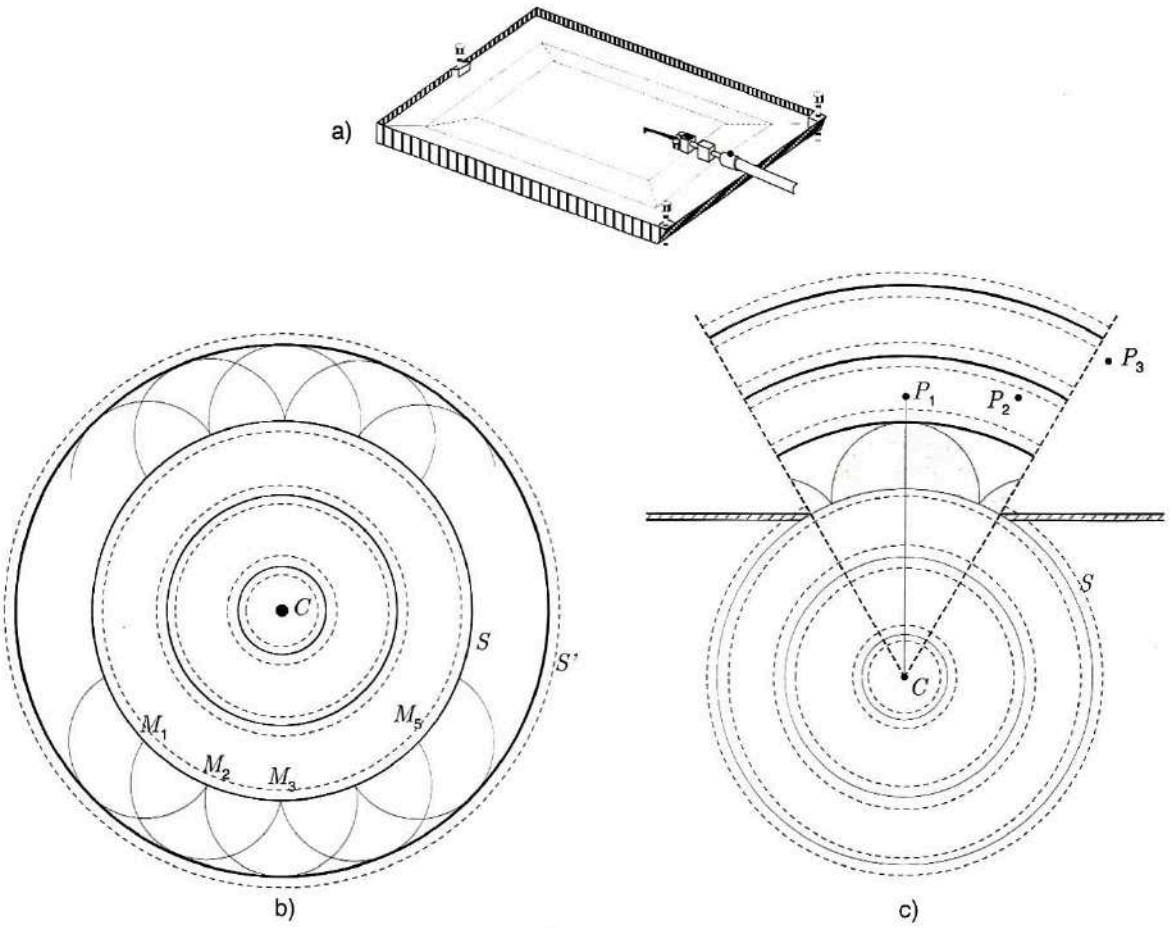


FIGURE 6.38 – Production d'une onde circulaire à la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes. (a) Schéma du dispositif expérimental ; (b) Illustration du mécanisme de la libre propagation. Selon le principe d'Huygens chaque point $M_1; M_2, M_3$, etc vibre en phase et se trouve donc sur une même surface d'onde. Ils jouent le rôle de source et génèrent des ondes circulaires également en phase. S et S' sont les enveloppes de toutes les ondes circulaires à deux instants différents. (c) Le principe d'Huygens s'applique également quand l'onde rencontre une fente. le point P_3 est dans la *zone d'ombre*. Cette zone d'ombre est d'autant plus petite que la fente est étroite, et donc plus la diffraction est importante jusqu'à ce que finalement une seule onde élémentaire se forme derrière l'ouverture.

6.4.2 Explications théoriques

Lorsqu'un onde atteint une fente, chacun des points de la fente, en vertu du principe d'Huygens, devient une source d'ondes élémentaires circulaires. L'enveloppe de ces ondes forme un segment rectiligne mais se terminant de chaque côté par un quart de cercle : de sont des ondes diffractées. Lorsque la fente est très étroite, nous avons une illustration saisissante du principe d'Huygens : la fente se comporte comme une seule source qui émet des ondes circulaires.

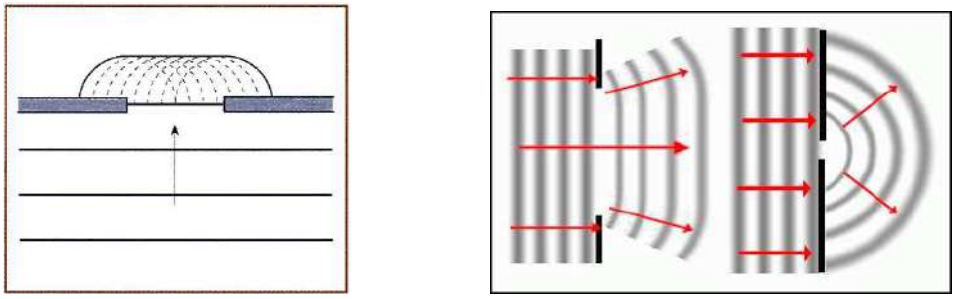


FIGURE 6.39 – (a) Le principe d'Huygens permet d'expliquer facilement le phénomène de diffraction. chacun des points de la fente devient une source d'ondes élémentaires circulaires .(b) Si la longueur d'onde est beaucoup plus petite que l'ouverture, l'onde la traverse presque en ligne droite. Par contre, quand la longueur d'onde est comparable aux dimensions de l'ouverture ou plus grande, le front d'onde se courbe et l'onde se propage dans des direction qui s'écartent largement de la normale à l'ouverture. Quand l'ouverture sera très petite, elle se comportera comme une nouvelle source d'ondes circulaires.

6.4.3 Conclusions

La **diffraction** des ondes est leur **déviation** dans plusieurs directions par des obstacles : elles ont déviées de leur direction initiale, elles contournent - plus ou moins - les obstacles (objets, fentes, etc). **Elles ne se propagent plus en ligne droite**. Ce phénomène apparaît **très peu** lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus petite petite de la largeur de l'obstacle : dans ce cas la propagation est **rectiligne**. Au plus la longueur d'onde se rapproche de la largeur de l'obstacle - tout en restant inférieure -, au plus il y a d'ondes diffractées. Lorsque la longueur d'onde est égale ou supérieure à la largeur de l'obstacle, il y a **beaucoup** de diffraction : une fente se comporte comme une source ponctuelle. Un objet devient "invisible" pour ces ondes, il n'y a plus "d'ombre" derrière l'objet. Lorsque la longueur d'onde est égale ou supérieure à la largeur de l'obstacle ou de la fente, il y a **beaucoup** de diffraction :

- une fente étroite se comporte comme une source ponctuelle ;
- derrière un objet étroit, il n'y a plus *d'ombre* et donc l'objet devient *invisible* pour les ondes. Ajoutons que dans ce cas, il y a très peu d'ondes réfléchies puisque les ondes contournent l'objet.

Corollaire Pour qu'un objet puisse être détecté par une onde, et donc renvoyer des ondes réfléchies, il faut que l'objet soit de dimension égale ou supérieure à la longueur d'onde λ. Autrement dit, plus l'objet est petit, plus petite doit être la longueur d'onde.

6.4.4 Applications

Dimensions d'un haut-parleur

Un haut-parleur se comporte comme s'il était une fente traversée par l'onde. (Voir figure 6.40). Un haut-parleur de 15 cm envoie une onde de 100 Hz ($\lambda = 3.4$ m) dans toutes les directions vers l'avant, comme s'il était une source ponctuelle. Par contre,dans le cas d'une onde de 10 kHz ($\lambda = 0.03$ m), la radiation du même-haut parleur sera essentiellement un cône étroit, vers l'avant. Il faut tenir compte de ceci en choisissant une bonne position, pour écouter un enregistrement de musique, ou judicieusement orienter les baffles. Ceci

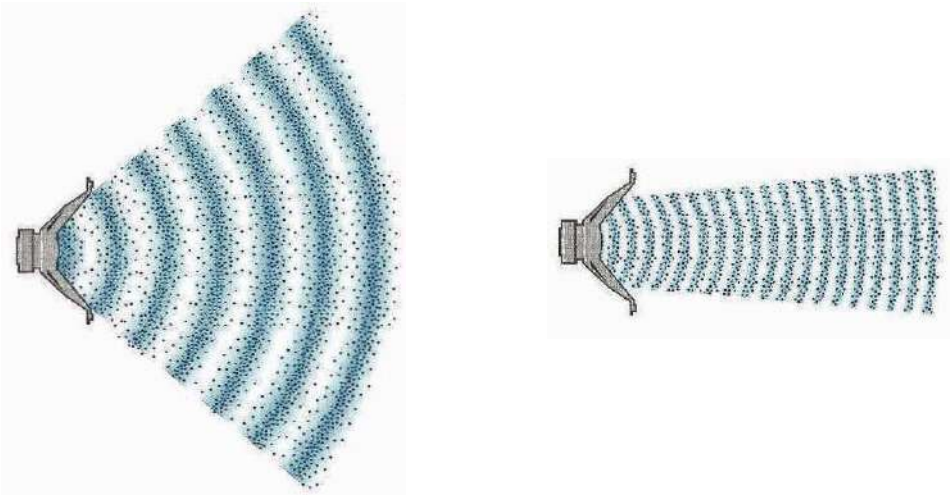


FIGURE 6.40 – La dimension du haut-parleur dépend des sons émis (a) Un haut-parleur de grande dimension est utilisé pour diffuser des sons graves donc de grandes longueurs d'onde, la diffraction est importante ; (b) Un haut-parleur qui diffuse des sons aigus sera de petite dimension, la diffraction sera peu importante.

explique aussi que les home-cinémas (Voir figure 6.41) comportent généralement un seul gros haut-parleur, qui diffuse les graves dans toute la pièce grâce à la diffraction, et, plusieurs petits hauts-parleurs qui diffusent les sons aigus avec peu de diffraction.

FIGURE 6.41 – Exemple d'un home-cinéma. On remarquera qu'il y a quatre petits hauts-parleurs pour les aigus à répartir de façon adéquate dans la pièce alors qu'il n'y a qu'un seul haut-parleur pour les graves.

Réception des ondes radio

Grâce à la diffraction, les ondes kilométriques (France Inter, RTL,etc) suivent la courbure de la terre et sont reçues à plus de 1000 km de la source. De plus, elles peuvent être reçues au fond d'une vallée. En effet, la longueur d'onde est bien supérieure aux obstacles. Autrement dit, une seule émetteur pourra suffire à couvrir un immense territoire. (Voir figure 6.42). Par contre, les ondes métriques (FM) ou décimétriques (TV ou GSM) ne peuvent pas suivre le relief et sont difficilement reçues au fond des vallées. Un contact

directe est nécessaire entre l'antenne émettrice et le récepteur. En effet, les obstacles de 100 m par exemple (une colline) sont beaucoup plus importants que la longueur d'onde et il n'y a pas de diffraction mais propagation rectiligne.

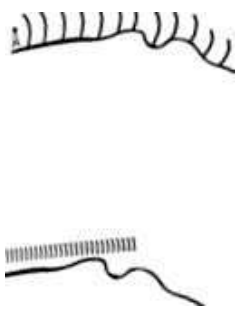


FIGURE 6.42 – (a) Les grandes ondes peuvent facilement suivre le relief et être reçues dans les vallées. D'immenses territoires peuvent être couverts par une seul antenne. (b) Les petites ondes ne peuvent pas suivre le relief et ne seront pas reçues dans le fond des vallées. Le territoire devra être couverts de plusieurs émetteurs judicieusement répartis.

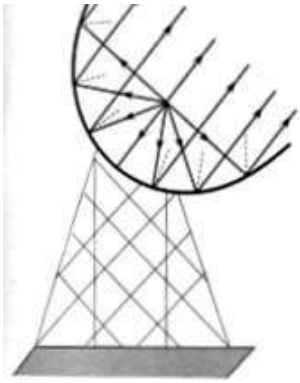


FIGURE 6.43 – Le diamètre des antennes paraboliques est déterminé par le type d'onde que l'on veut capter ou émettre. Plus la longueur d'onde est grande et plus devra être le grand le diamètre pour éviter trop de déperdition par diffraction..

Faisceaux d'ondes radio

En plaçant l'antenne émettrice au foyer d'un réflecteur parabolique, il est possible de créer un faisceau presque parallèle : presque toute l'énergie partira dans une seule direction vers un satellite , un relais, etc. (Voir figure 6.43) Il faut cependant que la longueur d'onde soit beaucoup plus petite que le diamètre du réflecteur, pour qu'il y ait une proportion importante d'ondes réfléchies. En effet, si le réflecteur était trop petit, il y aurait beaucoup de diffraction, les ondes contourneraient le réflecteur et ne seraient pas réfléchies. La même remarque vaut pour les antennes paraboliques réceptrices.

Echolocation

Nous avons déjà vu que certains animaux émettent des ondes acoustiques et ensuite captent les ondes réfléchies par les objets environnants, détectant ainsi les obstacles et proies éventuelles. C'est le cas des chauves-souris, des cétacés, etc. (Voir figures 6.18 et 6.19). Il faut pour cela que la longueur d'onde soit inférieure aux dimensions de l'obstacle à détecter. (Il faut donc ici peu de diffraction). En effet, si la longueur d'onde était plus grande que les objets, il y aurait trop de diffraction derrière celui-ci et il y aurait peu d'onde réfléchie. C'est pour cela que les dauphins et chauve-souris émettent des ondes acoustiques de fréquence élevée et donc de longueur d'onde très faible : ce sont des ultrasons ($f = 50.000$ Hz) C'est aussi le principe du sonar et du radar.

FIGURE 6.44 – Radioastronomie : Le VLA (Very Large Array) au Nouveau-Mexique est constitué de 27 antennes de 25 mètres de diamètre. Par rapport aux autres lumières, les ondes radio se distinguent par leurs grandes longueurs d'onde. Pour cette raison, il est nécessaire de recourir à de grandes antennes appelées des radiotélescopes. Parmi les exemples les plus connus, on peut citer le radiotélescope d'Effelsberg en Allemagne, une énorme antenne parabolique de 100 mètres de diamètre. L'un des problèmes majeurs de la radioastronomie est la résolution angulaire très décevante, même avec des télescopes de plusieurs centaines de mètres de diamètre. Les radioastronomes ont surmonté ce problème en construisant des interféromètres, c'est-à-dire des réseaux de plusieurs radiotélescopes séparés les uns des autres. Si l'on combine les signaux de différentes antennes observant simultanément le même objet, il est possible d'obtenir de nombreuses informations sur l'objet et même de reconstruire une image de celui-ci. La résolution angulaire de cette image est alors déterminée par la taille totale du réseau et non celle d'un seul télescope, d'où la possibilité de voir des détails très fins.

6.4.5 Lecture : La chauve-souris

FIGURE 6.45 – Une chauve-souris en plein vol.

La chauve-souris est un membre important de la faune et mérite d'être protégée pour son rôle de prédateur d'insectes. En effet, une seule chauve-souris brune peut facilement capturer 600 moustiques en une heure. Une colonie de 500 chauves-souris dévore un million d'insectes chaque nuit.

La chauve-souris, le seul mammifère capable de voler véritablement, appartient à

l'ordre des chiroptères, mot dérivé de l'apposition de deux termes grecs : « main » et « aile ».Il y a 900 espèces connues dans le monde.

Sauf chez quelques espèces, la chauve-souris n'est souvent pas plus grosse qu'une souris commune. L'accouplement a lieu en automne ou en hiver, et le sevrage des petits, généralement en juillet ou en août.

Les chauves-souris sont fidèles à leur lieu de naissance, retournant souvent au même dortoir année après année. Une chauve-souris peut vivre au-delà de 10 ans.

Les chauves-souris émettent des sons à haute fréquence inaudibles pour l'homme. Une chauve-souris peut émettre des sons à une fréquence de 80 kHz et percevoir les sons jusque 100 kHz. Ces sons, se frappant sur les objets qui se trouvent sur leur passage, leur permettent d'éviter des obstacles et de détecter des insectes en vol. Il arrive que l'on voit, le soir, des chauves-souris tournant autour des lampadaires parce que la lumière y attire les insectes. Contrairement à la croyance populaire, les chauves-souris ne sont pas aveugles. En fait, quelques espèces ont une excellente vision.

Les chauves-souris ont l'aptitude de ménager leur énergie en sombrant dans un état de dormance. On peut alors avoir l'impression qu'elles sont malades, endormies ou mortes. Parce qu'elles peuvent aussi montrer les dents et pousser des cris perçants, bien des gens pensent qu'elles sont méchantes. En réalité, la pauvre créature ne fait qu'essayer d'éviter une attaque éventuelle.

Les chauves-souris doivent aussi éviter l'oeil vigilant de leurs nombreux prédateurs, notamment : oiseaux de proie, chats, serpents et humains.

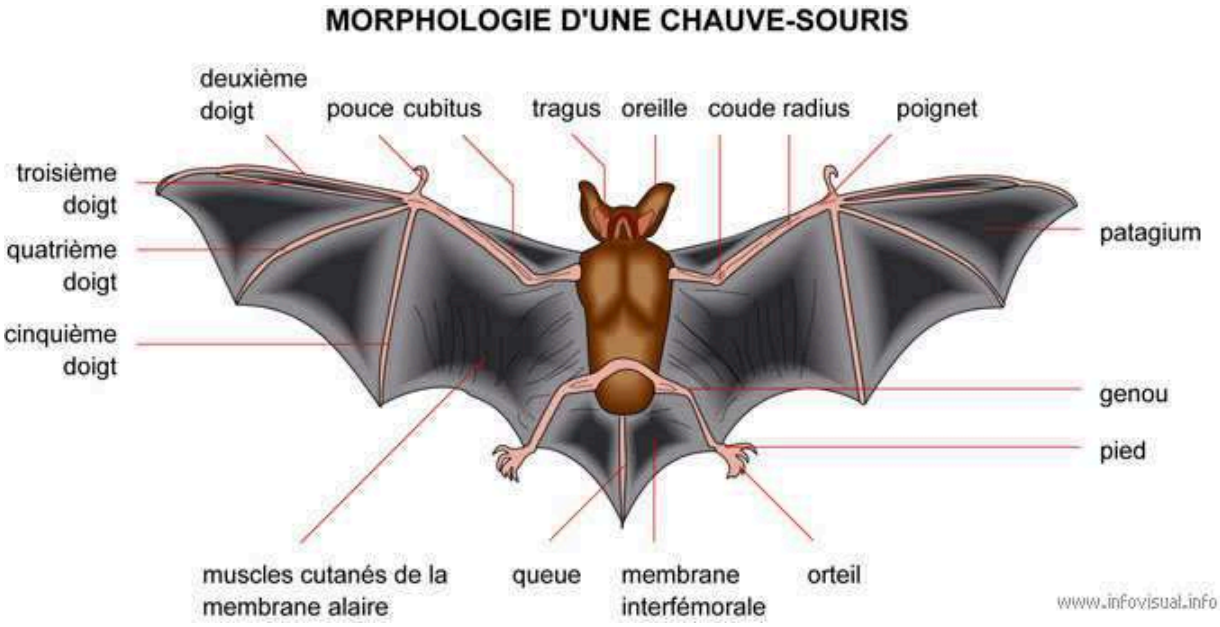


FIGURE 6.46 – Morphologie de la chauve-souris.

Indices de leur présence

Chauve-Souris Noire. Les chauves-souris manifestent généralement leur présence par des bruits ou des déjections.

Pour vérifier si les chauves-souris logent dans un bâtiment, il faut en inspecter l'extérieur avant qu'elles quittent leur dortoir (au crépuscule) ou quand elles reviennent de leur escapade nocturne (à l'aube). Une surveillance d'environ une heure pendant quelques jours devrait suffire à trouver toutes les entrées et sorties.

Les chauves-souris étant des créatures nocturnes, elles ne quitteront pas leur gîte si elles sont éblouies.

Renseignements ?

Pour plus de renseignements concernant ces mammifères protégés Plecotus, Groupe de travail chauves-souris Natagora, asbl de protection de la nature Rue du Wisconsin, 3 - 5000 Namur - Belgique Tél : +32(0)81/830 334 - Fax : +32(0)81/830 571 www.chauves-souris.be

Résumé

Il est absolument interdit de nuire, de tuer les chauves-souris en Belgique, de dégrader leur habitat ou leurs gîtes sans dérogation spéciale octroyée par la région Wallonne dans des conditions bien précises. Un service nommé S0S chauves-souris est destiné à aider les personnes qui se trouvent face à un problème de cohabitation avec les chauves-souris. Ce réseau est composé de bénévoles prêts à intervenir en Belgique pour trouver des solutions pacifiques.

6.5 Exercices

Sauf indications particulières, on prendra la vitesse du son dans l'air égale à 340 m/s.

1. Quels sont les trois phénomènes possibles lorsqu'une onde rencontre un matériau donné ?

2. Si un organe était réfléchissant à 100% pour les ultrasons, quelle conséquence cela aurait-il sur la profondeur de "vision" de l'échographie ?

3. Quels seraient les inconvénients d'un organe qui serait très absorbant pour les ondes de l'échographie ?

4. Lequel des quatre schémas (a,b,c ou d) de la figure 6.47 représente correctement un phénomène de réflexion ?

5. La figure 6.48 représente le passage d'ondes d'un milieu A vers un milieu B. Dans lequel de ces deux milieux la vitesse de propagation est-elle la plus élevée ? Si la fréquence des ondes est de 50 Hz et si la figure est à l'échelle 1 :1, calculer les deux vitesses.
6. Interpréter la figure 6.49 en nommant les différents phénomènes ondulatoires se produisant aux endroits A, B, C, D et D.

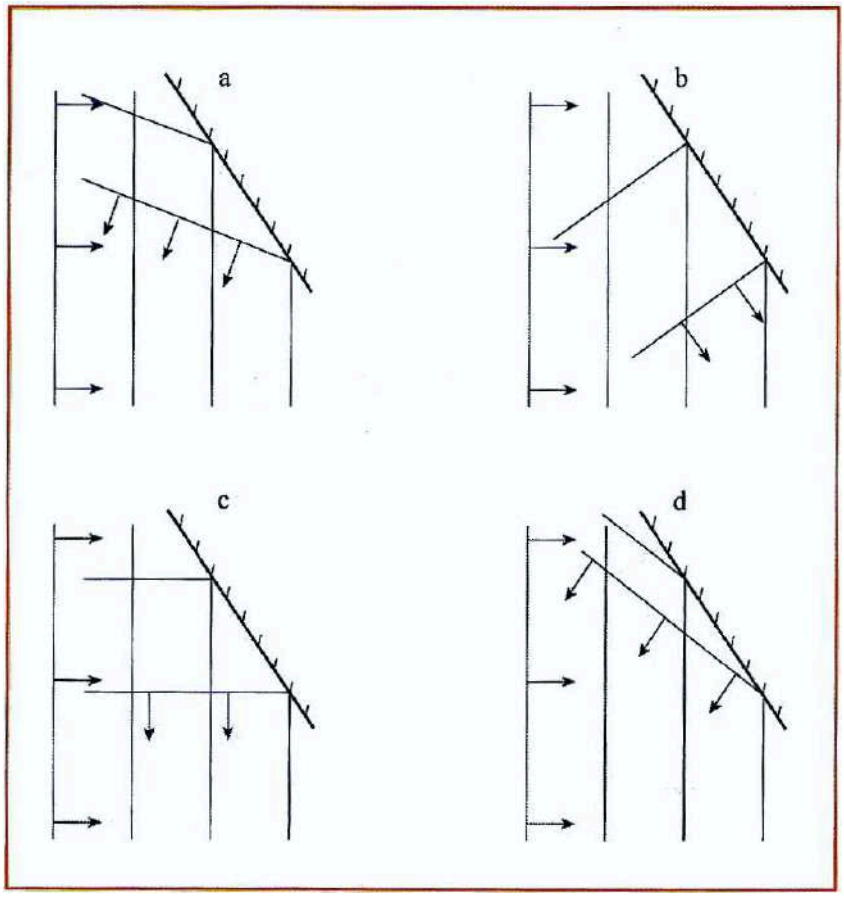


FIGURE 6.47 – Réflexion d'une onde.

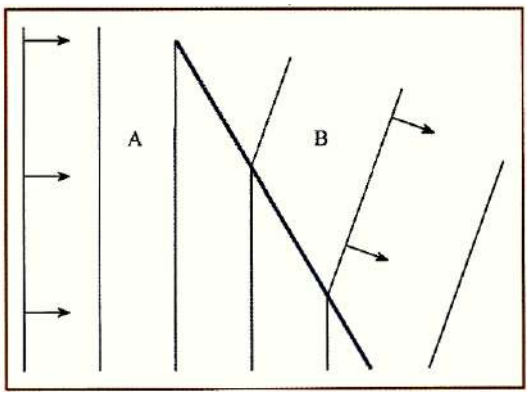


FIGURE 6.48 – Réfraction d'une onde.

7. Deux personnes A et B sont placés normalement à un obstacle respectivement à 320 m et à 430 m sur le même alignement. déterminer la durée qui s'écoule entre les auditions par B du son directement émis par A et du son réfléchi par l'obstacle. (Rép : 1.88 s)

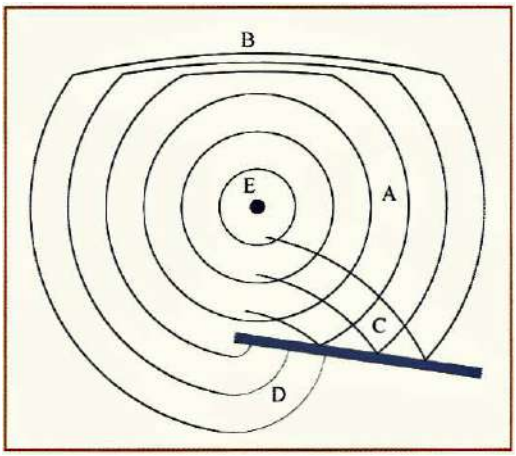


FIGURE 6.49 – Propagation d'une onde.

8. Un personne se promenant en montagne pousse un cri et entend l'écho après 3.2 s. A quelle distance se trouve l'obstacle qui a réfléchi le son ?
(Rép : 544 m)

9. Un observateur donne chaque seconde un coup de gong. Il entend l'écho du coup chaque fois au milieu de l'intervalle de temps qui sépare deux coups consécutifs. A quelle distance de l'observateur se trouve la paroi réfléchissante ?
(Rép : 85 m)

10. Deux endroits A et B, distants de 40 mètres, se trouvent du même côté et à la même distance d'un mur MN. Un observateur placé en B entend le son, qui arrive directement de A, 1/5 de seconde plus tôt que le son réfléchi par MN. Calculer la distance qui sépare A et B du mur.
(Rép : 50 m)

11. Une source sonore se trouve sur le segment de droite abaissé perpendiculairement d'un observateur à une surface réfléchissante. La source se trouve à 500 m de l'observateur et émet un son bref. L'observateur perçoit un premier son (direct) suivi d'un second (écho) à un intervalle de 10 s. Déterminer la distance qui sépare l'observateur de la surface réfléchissante.

12. Des ondes planes sonores arrivent avec un angle d'incidence de 80° sur la surface de séparation entre l'air et l'eau. Que va-t-il se passer ? Faire un schéma. Dans quelle milieu la longueur d'onde sera-t-elle plus petite ?
(Rép : réfraction ; $r = 50\ °$; $\lambda_{air} < \lambda_{eau}$)

13. Quelle est la fréquence minimale d'ondes acoustiques pouvant être utilisée pour détecter les poissons de longueur 10 cm. Justifier ?

14. Quelles fréquences pourraient être utilisées par un radar (qui utilise des ondes de la même famille que les ondes radio) pour détecter une voiture de largeur 2 m ? Justifier la réponse.

15. Une chauve-souris émettant des ultrasons de fréquence 50 kHz peut-elle détecter un papillon de nuit d'envergure 30 mm ? Justifier la réponse.

16. Une chauve-souris immobile émet des ultrasons de 80 kHz. Pourra-t-elle détecter un obstacle de 3 mm ? Justifier.
(Rép : Non car diffraction)

17. La chauve-souris émet des ultrasons dont la plus courte longueur d'onde est de 3.4 mm. Calculer la fréquence correspondante. La chauve-souris est-elle capable de localiser des insectes dont la taille ne dépasse pas 1 mm ?
(Rép : $f = 100$ kHz).

Les devises Shadok
IL VAUT MIEUX POMPER MÊME S'IL NE SE PASSE RIEN QUE RISQUER QU'IL SE PASSE QUELQUE CHOSE DE PIRE EN NE POMPANT PAS.

Chapitre 7

Superposition d'ondes

7.1 Introduction

En un point d'un ressort, d'une corde ou d'une surface d'eau peuvent arriver en même temps deux (ou plusieurs) ondes. Ces ondes peuvent être produites par :

1. un seul oscillateur. Chaque point est soumis en même temps à des ondes incidentes et à des ondes réfléchies.

2. deux sources différentes. Chaque point est soumis en même temps à des perturbations provenant de deux sources.

Que se passe-t-il pendant et après la rencontre de ces ondes ?

7.2 Principe de superposition

Examinons les photos de la rencontre de deux ondes se propageant en sens inverse. (Voir figures 7.1 et 7.2) A partir de ces exemples, nous constatons que :

L'élongation résultante en un point, à un instant donné, est la somme algébrique des élongations en ce point de chacune de ces perturbations à cet instant. Après la rencontre, les perturbations continuent à se propager indépendamment l'une de l'autre dans leur sen initial. Ceci constitue le **principe de superposition** que nous pouvons également écrire sous la forme :

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + ... = \sum_{i=1}^{N} y_i \tag{7.1}$$

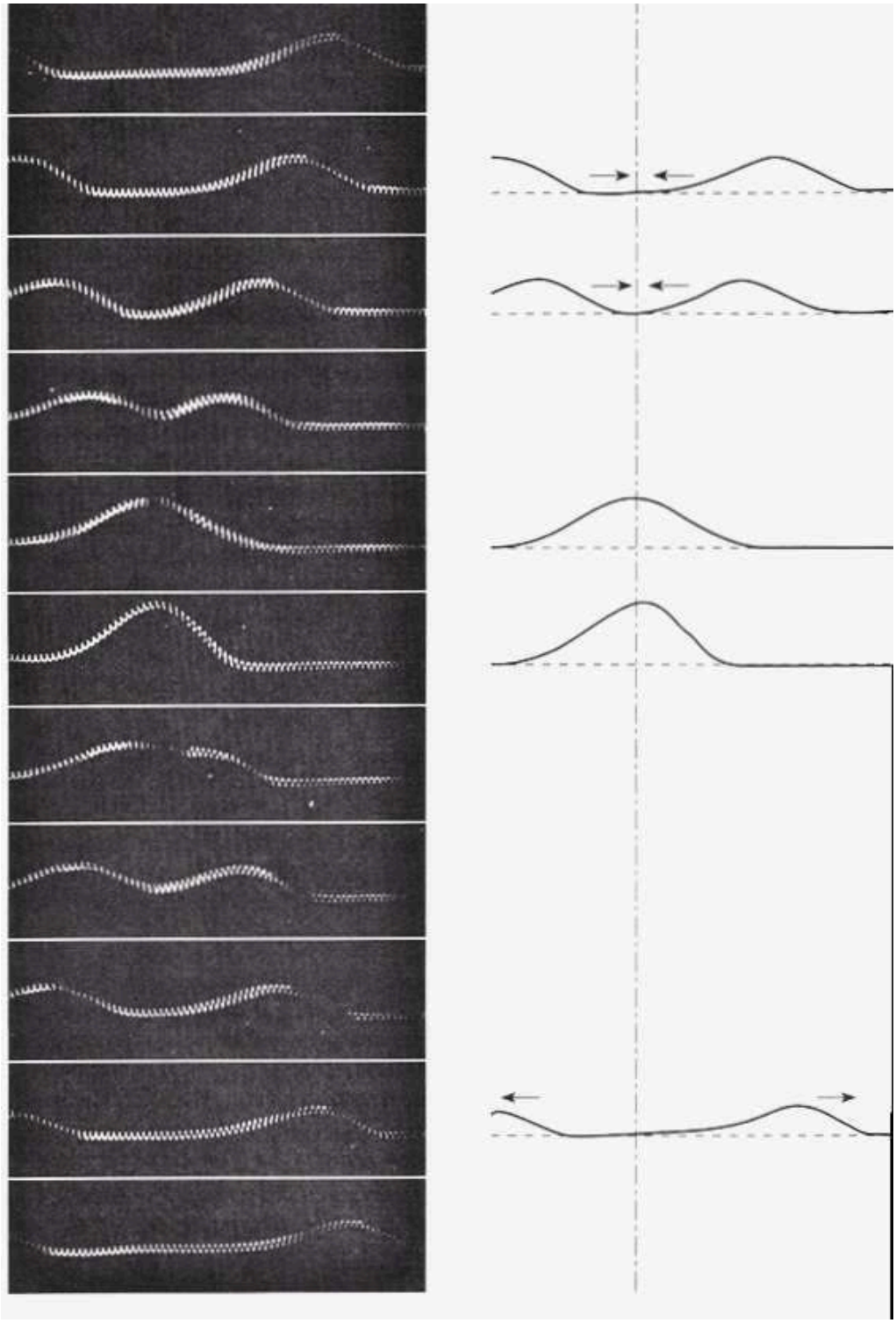


FIGURE 7.1 – Superposition de deux ondes de même signe ou de deux ondes en phase.

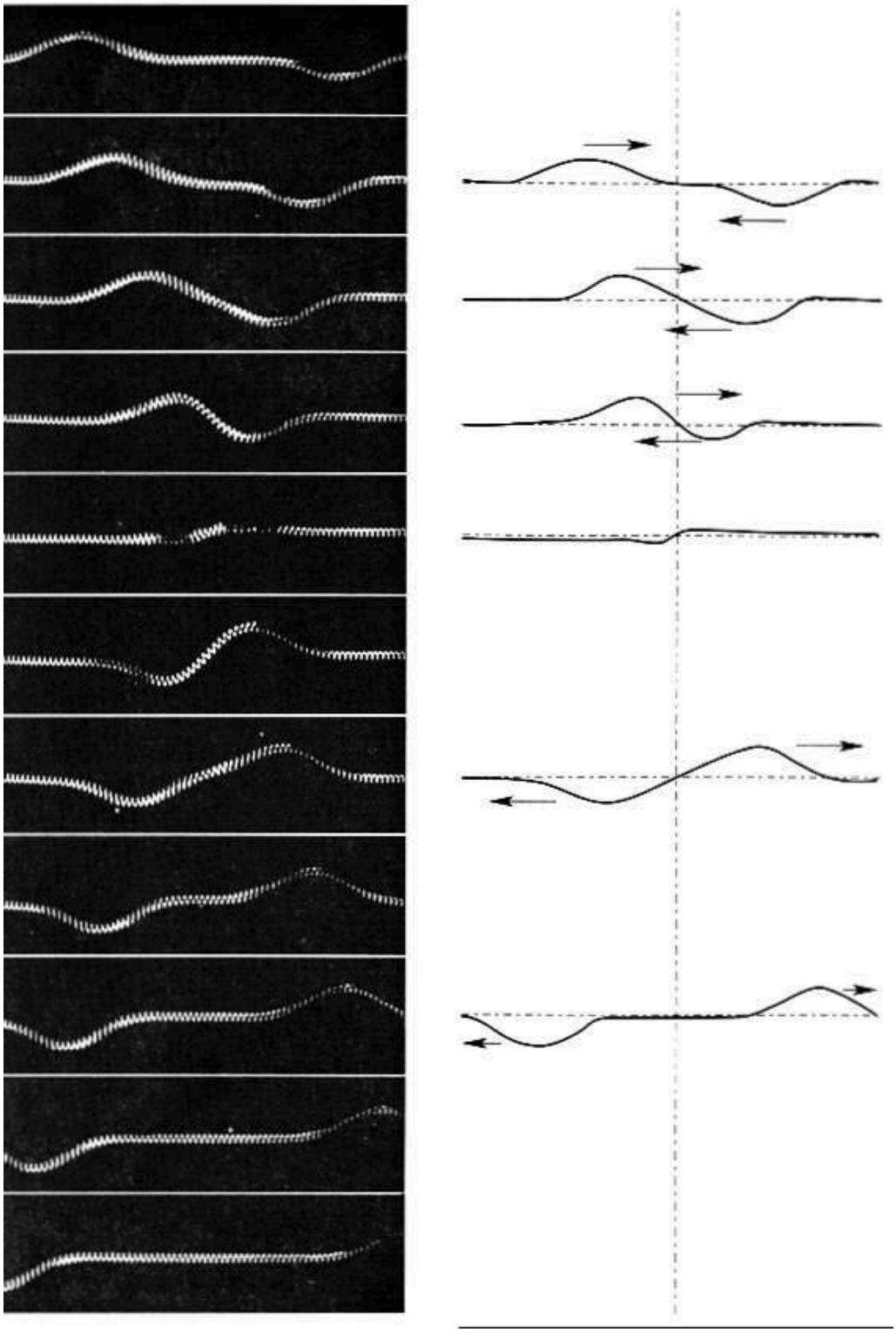


FIGURE 7.2 – Superposition de deux ondes de signe contraire ou de deux ondes en opposition de phase.

7.3 Ondes stationnaires

7.3.1 Réflexion d'une impulsion

Regardons d'abord ce qui se passe quand on envoie une impulsion sur une corde qui est fixée à une extrémité. (Voir figure 7.3)

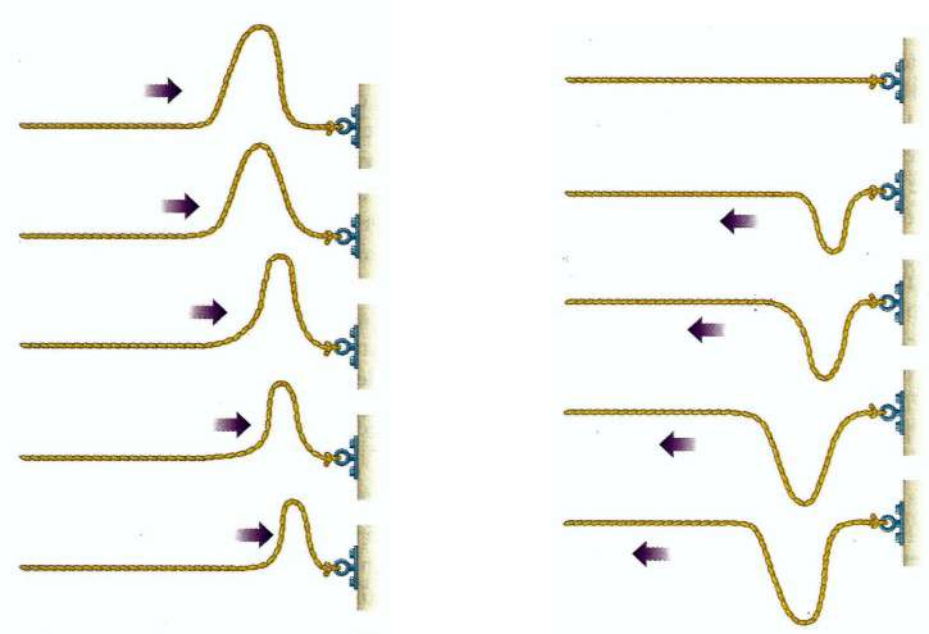


FIGURE 7.3 – Réflexion d'une impulsion d'onde sur l'extrémité fixe d'une corde. L'impulsion réfléchie est inversée et se propage dans le sens opposée à l'onde incidente.

En arrivant à l'extrémité fixe, l'impulsion exerce une force verticale sur le point d'ancrage. Celui-ci exerce par réaction une force opposée sur la corde. Quand la corde tire vers le haut, la fixation tire vers le bas. C'est cette force exercée par la fixation sur la corde qui engendre l'onde réfléchie renversée par rapport à l'onde incidente et qui se propage en sens opposé.

7.3.2 Ondes sinusoïdales

Ce phénomène de réflexion décrit pour une impulsion est général. Si l'onde incidente est une onde sinusoïdale, l'onde réfléchie est elle aussi une onde sinusoïdale de même fréquence et de même longueur d'onde mais qui se déplace en sens contraire. L'onde incidente et l'onde réfléchie vont donc se superposer.

A la figure 7.4, on dispose d'une longue corde fixée aux deux extrémités. A l'une des extrémités, on produit des déformations sinusoïdales entretenues. De cette manière, il est possible de voir s'installer le long de la corde des oscillations qui ne semblent pas se propager. Cette observation est tout à fait différente d'une situation d'ondes progressives. On parle pour cette situation de **modes stationnaires**. Nous constatons que chaque point oscille avec une amplitude qui lui est propre et qui est différente de celle des points voisins. Certains points appelés **noeuds** ont une amplitude nulle. D'autres points situés

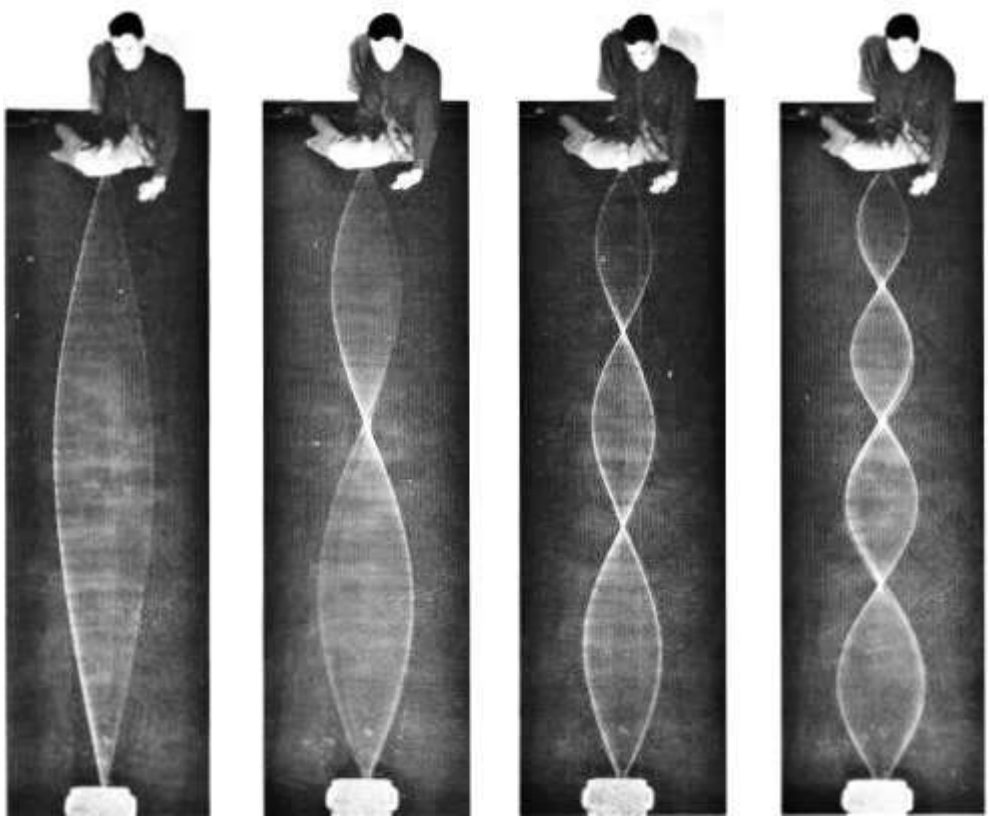


FIGURE 7.4 – Une corde fixée aux deux extrémités et soumise à des oscillations sinusoïdales entretenues est le siège d'ondes stationnaires. Les modes stationnaires sont strictement déterminés. De gauche à droite : le mode fondamental et les trois modes successifs.

à mi-distance entre deux noeuds successifs ont une amplitude maximale. Ils sont appelés **ventres** d'oscillations. Nous observons aussi que ces modes stationnaires existent pour **certaines fréquences déterminées**. A l'aide de fréquences d'oscillations de plus en plus élevées, on peut visualiser différents modes (ou régimes) stationnaires avec un plus grand nombre de noeuds.

La portion de la corde comprise entre deux noeuds successifs est appelée **fuseau**. Nous observons que tous les points d'un fuseau oscillent en concordance de phase entre eux. Par contre, les points de deux fuseaux voisins oscillent en opposition de phase entre eux. Par ailleurs, nous observons également que l'amplitude de chacun des ventres est beaucoup plus grande que l'amplitude de la source. l'aptitude d'amplifier le mouvement d'entrée est une caractéristique extrêmement importante des systèmes d'ondes stationnaires.

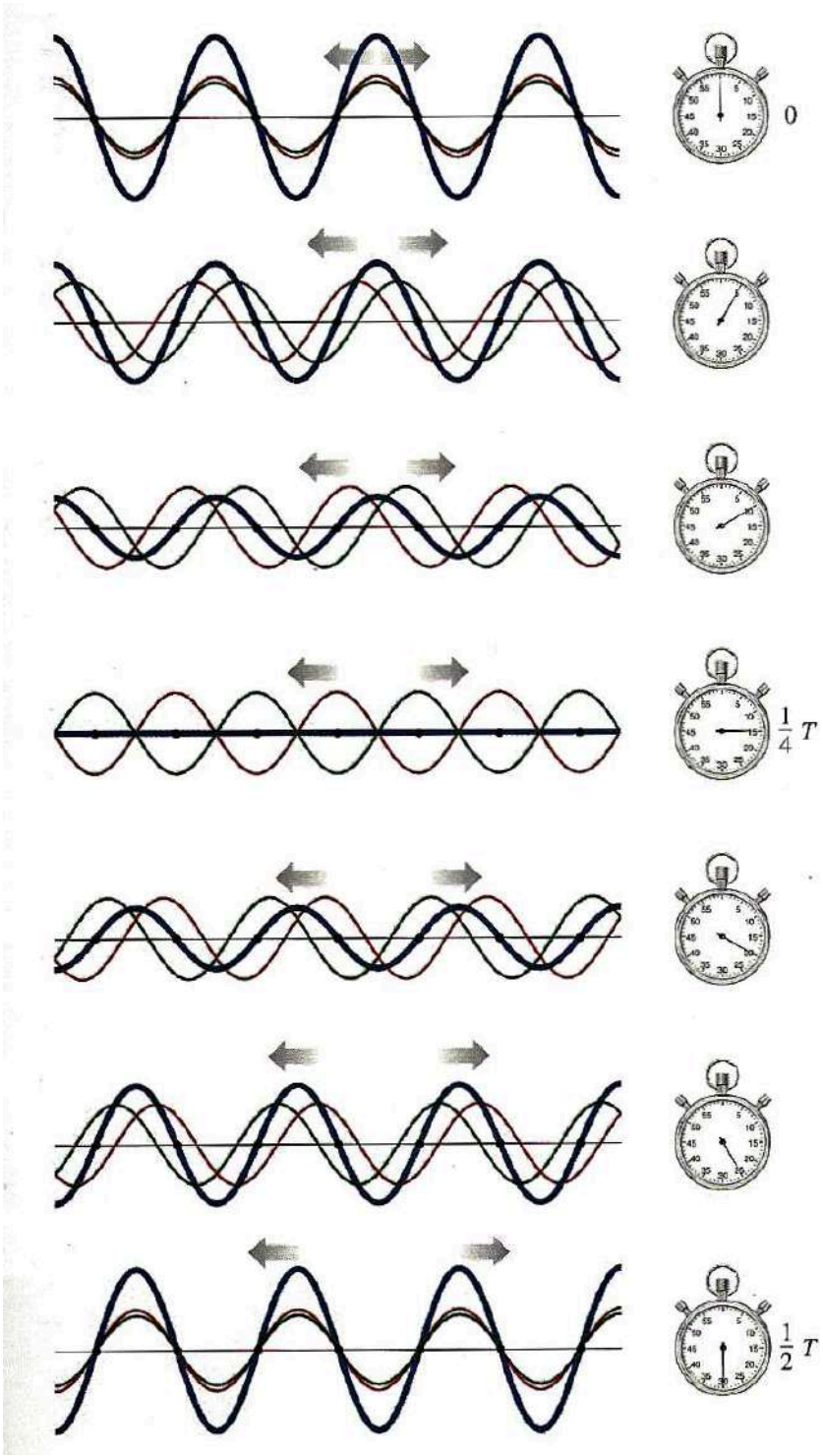


FIGURE 7.5 – Formation des ondes stationnaires. Deux ondes de même amplitude et de même longueur d'onde se propageant dans deux directions opposées forment une onde stationnaire en tout point du milieu sauf à l'endroit des *noeuds*.

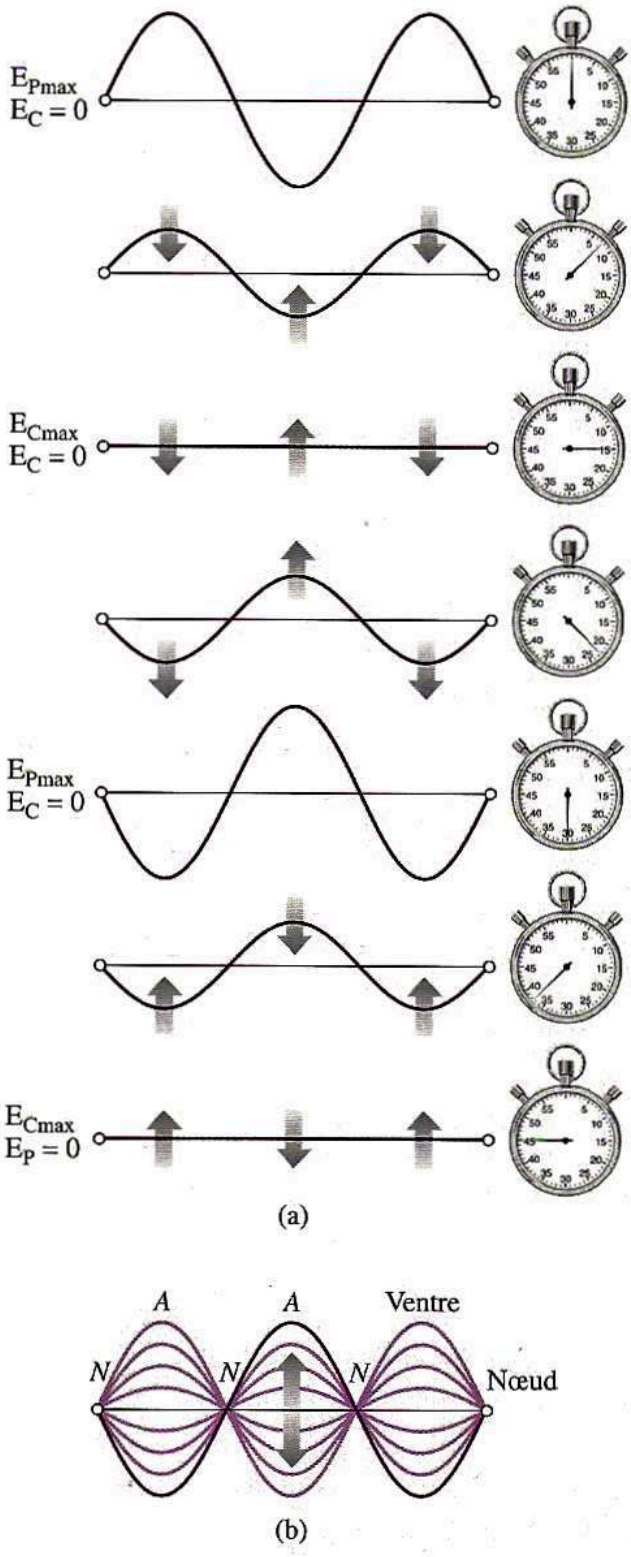


FIGURE 7.6 – (a) Une onde stationnaire sur une corde, dont les deux extrémités sont fixes. (b) Représentation de toutes les configurations de (a). La zone comprise entre deux noeuds est un *fuseau*.

7.4 Etude analytique

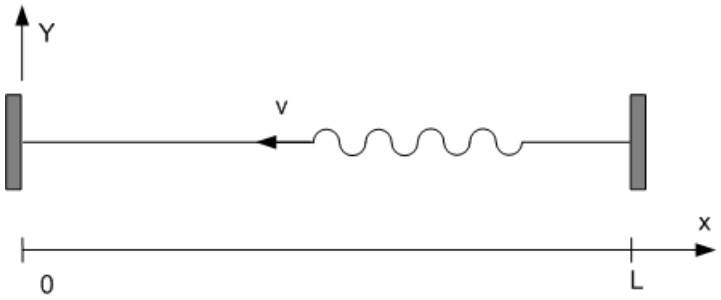


FIGURE 7.7 – Onde stationnaire sur une corde fixée aux deux extrémités.

Une corde est tendue, fixée à ses deux extrémités ($x = 0$ et $x = L$). (Voir figure 7.7. Si la corde est soumise à une déformation périodique ($t \longrightarrow \infty$), l'onde progressive crée et l'onde progressive réfléchie sur les extrémités vont se superposer pour donner naissance à un nouveau type d'onde : une onde stationnaire.

Soit en $x = L$, un moteur produisant une onde sinusoïdale appelée incidente dont l'équation est donné par l'équation 4.4 page 67 et qui se propage de la droite vers la gauche, c'est à dire

$$y_i = A_i \sin(kx + \omega t)$$

Cette onde va se réfléchir en $x = 0$, extrémité fixe, et son l'équation est :

$$y_r = A_r \sin(kx - \omega t)$$

Puisque l'énergie se conserve, on a $A_i = A_r = A$. En vertu du principe de superposition, la résultante vaut :

$$y = y_i + y_r$$
$$y = A\left[\sin(kx + \omega t) + \sin(kx - \omega t)\right]$$

Appliquons la formule de Simpson [1]

$$y = A\left[2\sin\frac{kx + \omega t + kx - \omega t}{2} \cos\frac{kx + \omega t - kx + \omega t}{2}\right]$$

Ou encore :

$$\boxed{y = 2A\sin kx\cos\omega t} \tag{7.2}$$

Cette équation n'est plus celle d'une onde progressive. Les variables x et t ne sont plus liées dans une même fonction comme dans $f(x - vt)$. On constate que le maximum de déformation de l'onde ne se déplace plus : on a une **onde stationnaire**.

Comme la corde est fixée en l'extrémité $x = L$, il faut que là, en tout temps, la corde ne puisse bouger, donc :

$$y_{x=L} = 0 = 2A\sin kL\cos\omega t$$

1. Formule de Simpson : $\sin p + \sin q = 2\sin\frac{p+q}{2}\sin\frac{p-q}{2}$

Cela n'est possible (pour tout t) que si :

$$\sin kL = 0 \rightarrow kL = n\pi \qquad \text{avec } (n \in \mathbb{N})$$

or $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, donc :

$$\frac{2\pi}{\lambda}L = n\pi \rightarrow \boxed{\lambda = \frac{2L}{n}}$$

On en tire donc une première conclusion très importante : *Le fait que la corde soit fixée en ses deux extrémités (ce sont des conditions aux limites) et qu'elle soit soumise à une excitation périodique résulte en une quantification du problème : les ondes ne peuvent exister sur cette corde que pour des fréquences particulières.* Suivant les valeurs prises par le nombre entier n, différentes vibrations vont résider sur la corde. n est un *nombre quantique*, puisqu'il détermine les états possibles. [2]

7.4.1 Mode fondamental : $n = 1$

Si $n = 1$, alors

$$\lambda = 2L \Rightarrow k = \frac{\pi}{L} \Rightarrow y = 2A \sin \frac{\pi x}{L} \cos \omega t$$

On déduit que la corde est le siège d'une onde de déformation de type sinusoïdale, dont la longueur d'onde est double de la longueur de la corde. En d'autres termes, sur la corde réside 1/2 longueur d'onde de la déformation.
Cependant, l'amplitude de l'onde sinusoïdale varie avec le temps, selon une loi $\cos \omega t$ (Voir figure 7.8) La figure représente la fonction $2A \sin \frac{\pi x}{L}$ pour différents temps particuliers (Il faut se rappeler que $\omega t = \frac{2\pi}{\mathrm{T}} t$). On remarque que tous les points de la corde vibrent en phase dans le temps, mais que chaque point de la corde a une amplitude différente. Chaque point de la corde a sa propre amplitude de vibration, et plus aucune déformation ne se propage de la gauche vers la droite et vice-versa.

Cela nous amène à définir les noeuds et les ventres :

1. Les **noeuds** sont les points immobiles de la corde (ici il y en a deux) ;
2. Les **ventres** sont les points de la corde qui ont le maximum d'amplitude (ici il y en a un).

7.4.2 Harmonique : $n = 2$

Si $n = 2$, alors

$$\lambda = L \Rightarrow k = \frac{2\pi}{L} \Rightarrow y = 2A \sin \frac{2\pi x}{L} \cos \omega t$$

La figure 7.9 rapporte quelques états particuliers de cette vibration de la corde. Cette déformation se caractérise par l'existence de 2 ventres et de 3 noeuds.

2. Un quantum, des quanta. En physique, un quantum désigne la quantité minimale d'une grandeur physique pouvant séparer deux valeurs de cette grandeur. Théorie des quanta : théorie due à Planck selon laquelle certaines grandeurs physiques ne varient pas de façon continue mais passent par des valeurs discontinues (discrètes) correspondant chacune à un nombre entier de quanta.

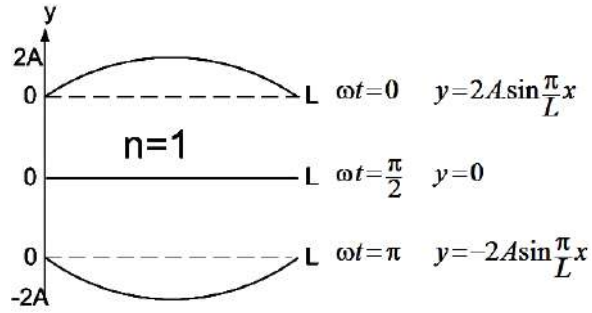


FIGURE 7.8 – Mode fondamentale : $n = 1$.

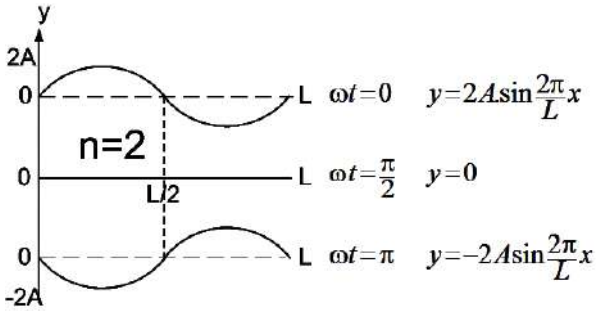


FIGURE 7.9 – Harmonique : $n = 2$.

7.4.3 Harmonique : $n = 3$

Si $n = 3$, alors

$$\lambda = \frac{2}{3}L \Rightarrow k = \frac{3\pi}{L} \Rightarrow y = 2A \sin \frac{3\pi x}{L} \cos \omega t$$

La corde doit sur sa longueur recevoir 3/2 longueur d'onde. Au cours de temps, l'amplitude de vibration des différents points de la corde varie selon les graphes de la figure 7.10. On y remarque l'existence de 3 ventres et 4 noeuds.

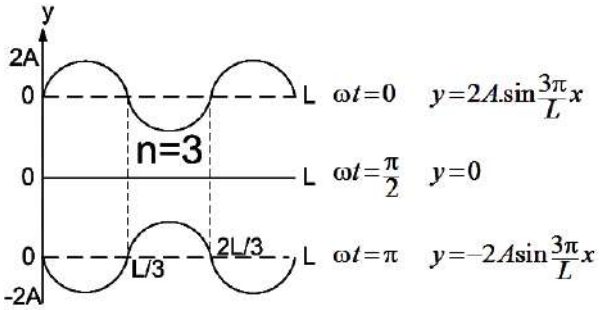


FIGURE 7.10 – Harmonique : $n = 3$.

7.4.4 Conclusion

De façon générale, deux ondes de même amplitude et de même longueur d'onde se propageant dans des directions opposées donnent une onde stationnaire.

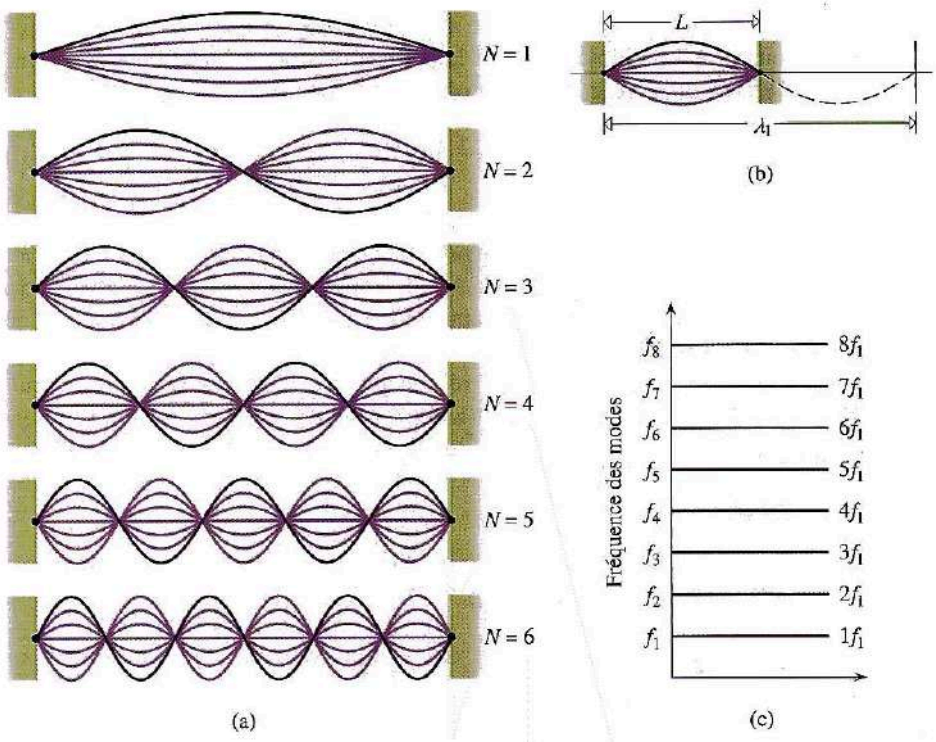


FIGURE 7.11 – (a) Modes d'une onde stationnaires sur une corde avec un noeud à chaque extrémité. (b) La longueur d'onde du mode fondamental ($n = 1$) et $2L$. (c) Quelques premiers modes d'oscillation harmoniques.

7.5 Corde libre à une ou aux deux extrémités

Nous nous contenterons d'illustrer les résultats obtenus pour une corde dont une ou les deux extrémités sont libres.

1. Une extrémité libre et une extrémité fixe : un ventre sur l'extrémité et un noeud sur l'extrémité libre. (Voir figure 7.12) Les longueurs d'onde autorisées sont données par :

$$L = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \qquad \text{avec } n \in \Re$$

2. Deux extrémités libres : les ventres sont sur les extrémités. (Voir figure 7.13) Les longueurs d'onde autorisées sont données par :

$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad \text{avec } n \in \Re$$

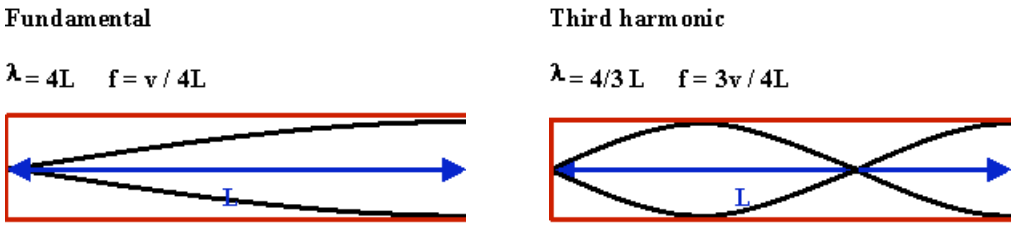


FIGURE 7.12 – Une extrémité fixe et une extrémité libre. (a) Mode fondamental (b) Troisième harmonique.

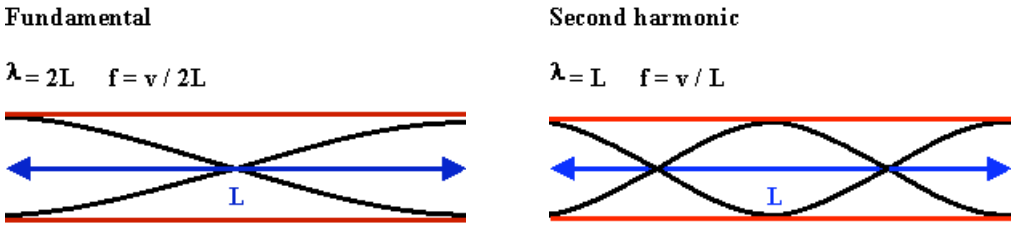


FIGURE 7.13 – Deux extrémités libres () Mode fondamental (b) Deuxième harmonique.

7.5.1 Conclusion

Deux ventres voisins sont séparés par une demi-longueur d'onde ($\lambda/2$) . De même, pour la distance séparant deux noeuds voisins. La distance séparant un noeud d'un ventre voisin est donc de $\lambda/4$

7.6 Les régimes stationnaires dans l'air

Considérons un vase cylindrique (5 à 10 cm de diamètre et de 50 cm de hauteur environ) et remplissons le à ras bord d'eau. (Voir figure 7.14). Un haut parleur est fixé à 1 cm de ce niveau (même diamètre) et émet un son de fréquence connue (1 à 2 kHz). Un siphon permet de faire descendre le niveau de l'eau. Et enfin une règle permet de mesure le longueur L de la colonne d'eau.
Lorsque nous faisons descendre le niveau de l'eau, nous notons que le son devient alternativement fort et faible. ce phénomène s'explique par la formation de régimes stationnaires dans la colonne d'air située entre l'eau et le haut-parleur. Cette colonne se comporte comme une corde fixée à une extrémité (la surface de l'eau) et libre à l'autre extrémité (l'ouverture). Le son est plus intense lorsqu'il y a un ventre de vibration à l'ouverture du vase. le régime le plus simple consiste en un ventre à l'ouverture du vase et un noeud sur la surface de l'eau. L'eau étant très peu compressible *bloque* les vibrations de l'air. Ce régime correspond à une longueur L égale au quart de la longueur d'onde. Au fur et à mesure de la vidange, on allonge la colonne d'air et d'autres régimes font alors pouvoir apparaître : pour $L = \lambda/4$; puis $L = 3\lambda/4$; $L = 5\lambda/4$, etc.

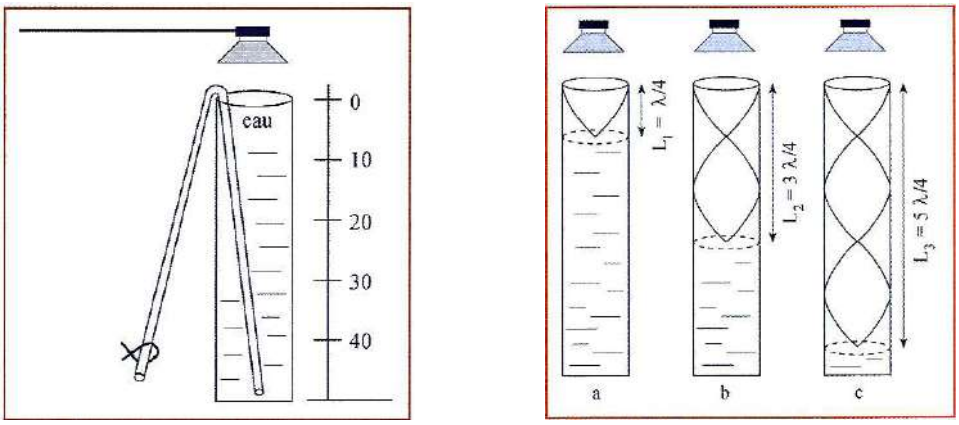


FIGURE 7.14 – (1) Dispositif expérimental. (2) (a) Régime le plus simple : un ventre à l'ouverture et un noeud sur la surface de l'eau $L_1 = \lambda/4$; (b) Deuxième régime : $L_2 = 3\lambda/4$; (c) Troisième régime : $L_1 = 5\lambda/4$

7.7 Applications

7.7.1 Physique moderne

Les ondes stationnaires jouent un rôle fondamental en physique moderne dont une introduction sera donnée dans un autre cours. Mentionnons déjà deux points importants.

1. L'étude des ondes stationnaires introduit de façon assez naturelle la notion de nombre quantique. Dans la nature, tous les états ne sont pas possibles. Autrement dit la nature doit ne peut pas se décrire au moyen de modèles continus mais grâce à des modèles discrets. Nous montrerons que ceci est général. Les implications tant sur le plan scientifique que philosophique sont énormes. [3]

2. Ce sont les ondes stationnaires qui permettent d'expliquer pourquoi l'électron tourne autour du noyau sur une orbite stable et pourquoi seules certaines orbites sont autorisées. [4]

3. la continuité est définie mathématiquement comme une régularité. La continuité s'exprime comme une propriété graphique de la fonction qui est représentée par une ligne continue (par opposition à une ligne discontinue). Une application continue en un point prend des valeurs qui ne contrastent pas avec celles qu'elle prend au voisinage de ce point - à l'inverse, une application discontinue présente des valeurs qui peuvent être très différentes en un point et en un de ses voisinages. En 5ème, on approche les notions de continuité en un point [f est continue en un point a de $\Re$ de son ensemble de définition lorsque la limite de f en a existe et vaut $f(a)$] et continuité sur un intervalle [f est continue sur un intervalle I inclus dans son domaine de définition lorsqu'elle est continue en tout point a de $\Re$ appartenant à I]. On admet ensuite sans le démontrer que les fonctions polynômes, rationnelles, trigonométriques, logarithmes, exponentielles, racine carrée, valeur absolue ainsi que les fonctions obtenues par opérations algébriques sur ces fonctions, etc, sont TOUTES CONTINUES sur tout intervalle contenu dans leur ensemble de définition. Mais, d'une façon plus générale et donc topologiquement, le continu s'oppose au discret. Par exemple l'ensemble des nombres réels R est continu (représentons-le par une ligne continue) alors que Z, ensemble des entiers relatifs est discontinu ou discret (et peut être représenté par une ligne discontinue de points) ; $\Re$ est un espace dit connexe et Z est dit discret ; la richesse du problème posé par ces différences fait l'objet d'un questionnement toujours actuel.

4. En fait, en physique moderne, il convient de parler d'orbitale et non pas d'orbite

7.7.2 Les instruments de musique

Il existe trois grandes catégories d'instruments de musique : les instruments à percussion, à cordes et à vent.

Caisse de résonance

Les instruments de musique sont en général équipés d'une caisse de résonance qui a pour rôle de recevoir et d'amplifier la vibration produite par la ou les corde(s), ou par la membrane. Pourquoi une caisse de résonance permet-elle d'augmenter la puissance du son. Revenons à la formule qui nous donne l'énergie d'un oscillateur voir équation 2.7 page 23 :

$$E = \frac{1}{2} m.\omega^2.A^2 = 2\pi^2.m.f^2.A^2$$

Cette formule indique que l'énergie (donc la puissance et donc l'intensité) d'un oscillateur est proportionnelle au carré de l'amplitude. Or l'établissement d'un mode stationnaire permet d'obtenir des oscillations dont l'amplitude sera le double de l'amplitude de l'onde qui aura donnée naissance à ce mode stationnaire. Autrement dit, grâce au phénomène d'onde stationnaire, nous pouvons produire des sons dont l'intensité sera multipliée par quatre. [5]

Les instruments à cordes

FIGURE 7.15 – Un célèbre joueur de lyre.

La guitare, la harpe, le violon mais aussi le piano sont des instruments à cordes. Le nombre de cordes est parfois très grand (harpe, piano), mais aussi parfois très limité (4

5. Quelques exemples de caisses de résonance « de fortune » ou encore « primitives » : un bidon, une poterie, une calebasse, la bouche - pour la guimbarde par exemple, les deux mains disposées en porte-voix, etc. Le timbre, l'intensité et la durée du son obtenu dépendent du volume, de la forme et de la matière de la caisse de résonance. Tous ces facteurs collaborent à donner à l'instrument une valeur subjective de sa sonorité, qu'on appelle souvent la « projection » et qui correspond à la puissance sonore qu'il est capable de développer par son amplification naturelle du son.
La caisse de résonance, qui donne toute sa puissance sonore à un instrument, n'est pas la seule partie qui contribue à « fabriquer » le son : toutes les parties entrant en vibration, notamment le manche sur les instruments tels le violon ou la guitare, ont une influence sur les sonorités jouées et perçues - sans parler des influences des matériaux sur le timbre général. Par exemple, on peut faire ressentir un effet de vibrato particulier en agitant par saccades le manche d'une guitare.

pour le violon, 6 pour la guitare). Lorsqu'une corde est frottée (violon), pincée (guitare, lyre ou clavecin) ou frappée (piano) , elle vibre selon des modes stationnaires avec deux extrémités fixes. La fréquence fondamentale correspond au mode stationnaire avec un seul ventre.

On peut montrer que la vitesse de propagation des ondes transversales le long d'une corde dépend de la force de tension exercée sur la corde (F_t) et de la masse par unité de longueur (μ), selon la relation :

$$v = \sqrt{\frac{F_t}{\mu}} \tag{7.3}$$

Exemple Quelle soit être la tension de la corde mi_4 d'un violon pour qu'elle soit accordée à 660 Hz ? La longueur de la corde est de 330 mm et sa masse par unité de longueur de 0.38 g/m.

Solution Le violon est accordé à la fréquence fondamentale de 660 Hz, donc $n = 1$.

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} \qquad \text{or} \qquad v^2 = \frac{F_t}{\mu}$$

donc

$$F_t = v^2.\mu = 4f^2L^2\mu = 4 \times 660^2 \times 0.33^2 \times 0.38 \times 10^{-3} = 72\,\text{N}$$

Les instruments à vent

Pour les instruments comme les tuyaux d'orgue ou la flûte de Pan[6], c'est la colonne d'air dans chaque tuyau qui constitue la source sonore ; il s'établit un mode stationnaire dont la fréquence dépend de la longueur de la colonne. (Voir figures 7.16)

7.8 Lecture : la voix

La voix humaine résulte de l'action combinée de la glotte (ouverture du larynx) qu'entourent les cordes vocales et de plusieurs cavités contenant l'air : les cavités buccales, nasales et pharynx. les cordes vocales sont en fait des replis élastiques de la muqueuse tapissant le larynx. Lorsque l'air est expulsé à travers la glotte, les cordes vocales tendues à ce moment, entrent en vibration. La hauteur du son dépend de la longueur et du degré de tension de ces membranes. (Voir figures 7.19).

Comme la longueur des cordes vocales chez les hommes (20 à 35 mm) est plus grande que chez les femmes (15 à 20 mm) les sons sont plus graves. Les cordes vocales d'un enfant sont petites : le son est aigu. Cependant, à la puberté, l'acccroissement rapide de la longueur fait que la voix du garçon devient plus grave : la voix mue.

6. Pan est le protecteur des bergers et des troupeaux. Il est généralement figuré avec des pieds de bouc et des cornes. Souvent confondu avec les satyres (hommes à demi caprins, oreilles, queue et pieds de chèvre), Pan est représenté de manière moins humaine, caractérisé par sa laideur et sa sauvagerie. En plus de la nature, Pan est associé à la fécondité. L'Hymne homérique qui lui est consacré le nomme fils d'Hermès et d'une nymphe, fille de Dryops. Il naît ainsi sur le mont Cyllène, en Arcadie. Devant son apparence monstrueuse, sa mère s'enfuit, mais le père porte son fils sur l'Olympe (ce qui confèrera à Pan sa nature divine), où tous les dieux se réjouissent de le voir. Selon l'auteur, ce serait l'origine de son nom : tous [Pan] les dieux furent réjouis.

FIGURE 7.16 – (a) Flûte de Pan. (b) Orgues de Saint-Remi de Reims. Il s'agit d'un puissant orgue disposant de 44 jeux, avec trois claviers et un pédalier. Il pèse huit tonnes. Placé en *nid d'hirondelle* à 5,6 mètres du sol, le buffet atteint 11,20 mètres de haut et abrite plus de 3 000 tuyaux nécessaires à son fonctionnement. Sa facture originale lui permet aussi d'interpréter des oeuvres contemporaines.

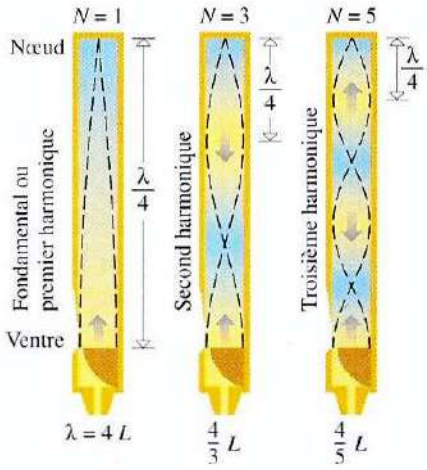


FIGURE 7.17 – Quelques ondes stationnaires dans un tuyau d'orgue ouvert à son extrémité inférieure. Les flèches indiquent la direction de déplacement de l'air pendant la moitié d'un cycle. Les lignes tiretées indiquent les positions des noeuds et des ventres de déplacement. Tous les instruments en cuivre sont fermés à une extrémité par la bouche de l'instrumentiste.

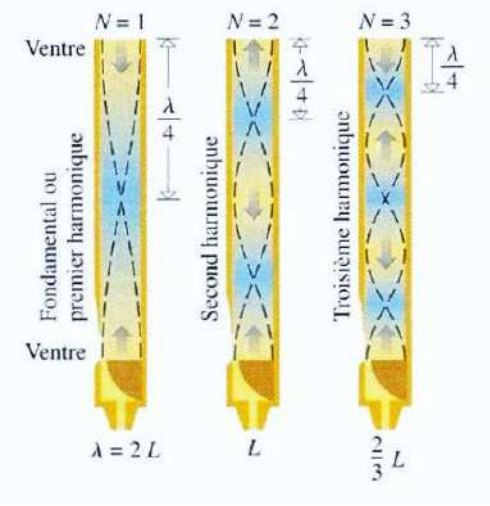


FIGURE 7.18 – Les premières ondes stationnaires dans un tuyau sonore ouvert à ses deux extrémités. Les flèches indiquent la direction du mouvement de l'air pendant la moitié d'un cycle. Ici, les deux extrémités du tuyau sont à pression atmosphérique, ce qui correspond à un noeud de pression.

La fréquence limite d'émission de la voix est de 3 kHz environ (Comparer avec les 80 kHz de la chauve-souris). Le son émis par les cordes vocales est faible : il est amplifié par l'air contenu dans les cavités mentionnées ci-dessus. Le volume d'air peut ensuite se modifier par le jeu des joues, lèvres et bouche. Le son résultant est caractérisé par une fréquence fondamentale bien déterminée et par un grand nombre d'harmoniques. Le son

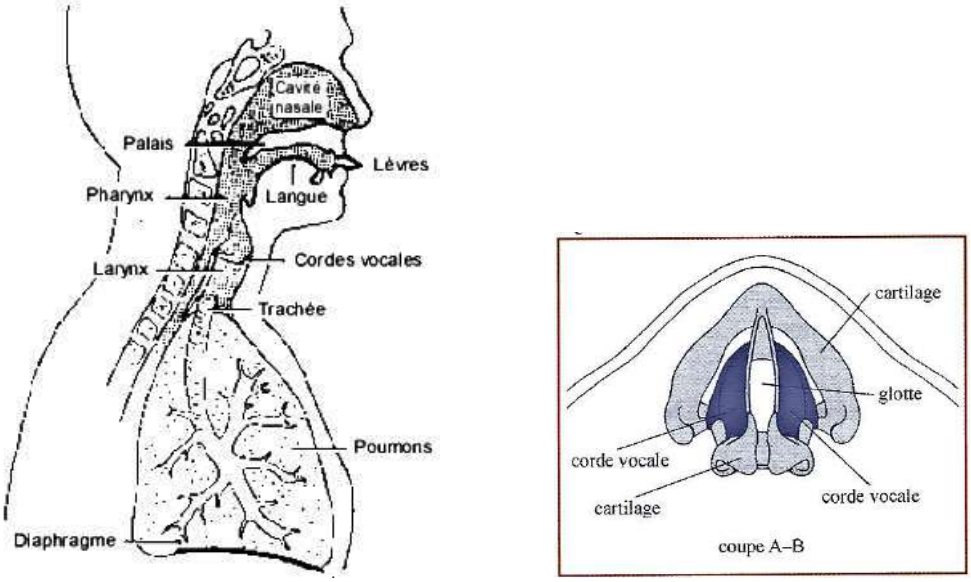


FIGURE 7.19 – (a) Schéma des parties du corps impliquées dans la production de la voix. (b) Détail des cordes vocales.

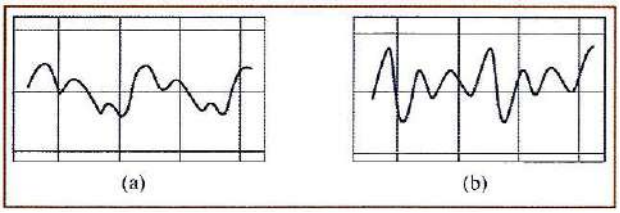


FIGURE 7.20 – Les sons sont complexes (a) oscillogramme d'un "i" et (b) d'un "o".

est donc complexe. (Voir figure 7.20). Notons enfin que si les voyelles sont produites par les cordes vocales elles-mêmes, les consonnes sont des bruits qui ne sont font entendre que parcequ'elles accompagnent l'émission des voyelles.

FIGURE 7.21 – La typologie classique, reprise entre autres par Hector Berlioz dans son Traité de l'orchestration, a choisi de retenir six principaux registres (grave/médium/aigu), nommées comme suit en termes musicaux : (a) Les sopranos, ou voix aiguës de femmes et d'enfants (voire rarement d'hommes) (b) Les mezzo-sopranos, ou voix moyennes de femmes et d'enfants, voire d'hommes (c) Les altos, ou voix graves de femmes et d'enfants, voire d'hommes (d) Les ténors, ou voix aiguës d'hommes (e) Les barytons, ou voix moyennes d'hommes (f) Les basses, qui comme leur nom l'indique correspondent aux voix graves d'hommes.

7.9 Les interférences

Comment deux ondes de même fréquence provenant de deux sources différentes se superposent-elles en un point de l'espace ?

7.9.1 Expérience

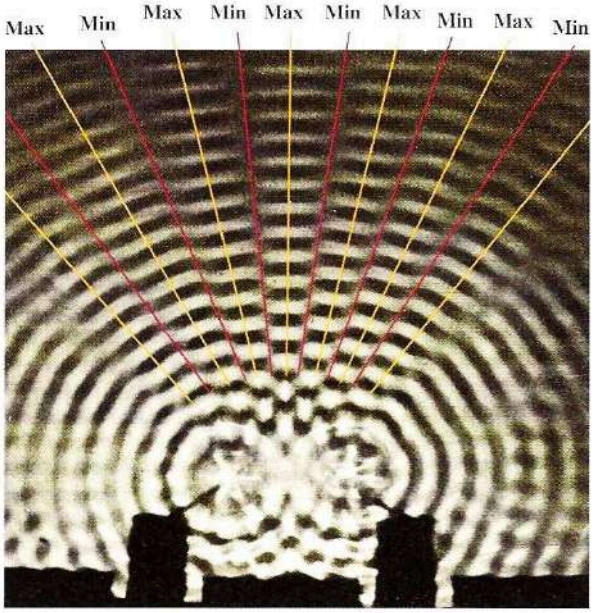


FIGURE 7.22 – Des rides circulaires produites à la surface de l'eau par deux oscillateurs en phase, se combinent pour former des franges, où l'ébranlement est maximum. La médiatrice du segment qui joint les deux sources est l'une de ses franges.

Deux pointes S_1 et S_2 s'enfoncent au même rythme dans la cuve à ondes. (Voir figure 7.22).

On observe des couloirs limités par des lignes incurvées sur les quelles l'eau est immobile. Elles forment des *lignes de noeuds* ou des **lignes nodales** ou encore **lignes de repos**. Ce sont des minima de vibration. Au milieu de ces couloirs, les points vibrent très fort et ils forment des **lignes de ventres** ou **lignes ventrales** ou encore **lignes de tempêtes**. Ce sont des maxima de vibration. **La superposition de deux ondes de même fréquence est appelée interférence**. Ce phénomène engendre dans l'espace des *points immobiles* et des *points vibrant au maximum*.

Ainsi la superposition

1. de deux mouvements peut donner le repos
2. de deux sons peut donner le silence
3. de deux lumières peut donner l'obscurité (voir le chapitre sur la lumière)

les phénomènes d'interférences peuvent être réalisés avec tout type d'onde. La figure 7.23 montre une figure d'interférence obtenue à partir de deux haut-parleurs en phase. Les phénomènes d'interférence sont très importants car ils *prouvent* le caractère ondulatoire des sources et ils permettent de mesurer la longueur d'onde ainsi que la fréquence des ondes.

FIGURE 7.23 – Interférences de deux ondes sonores. Là où une crête (région foncée) d'une onde se superpose à une crête de l'autre, il y a renforcement de l'onde. Là où un creux d'une onde se superpose à une crête de l'autre, il y a annulation de l'onde.

7.9.2 Etude analytique

Soient deux ondes, chacune issue d'une source différente (S_1 et S_2). Pour simplifier considérons que les amplitudes et les fréquences sont identiques. Considérons aussi un point P situé à une distance d_1 de S_1 et à une distance d_2 de S_2. (Voir figure 7.24).

L'équation de l'onde issue de S_1 et arrivant en P est : $y_{S_1} = A\sin(kd_1 - \omega t)$. Et celle issue de S_2, arrivant en P, est : $y_{S_2} = A\sin(kd_2 - \omega t)$.

Le point P est soumis à 2 ondes de même fréquence, de même amplitude. Appliquons

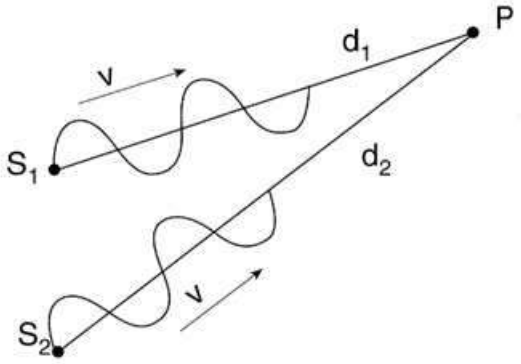


FIGURE 7.24 – En tout point P de la surface de l'eau, il y a superposition des deux vibrations. provenant des source S_1 et $S_2$2.

le principe de superposition

$$y = y_1 + y_2 = A\sin(kd_1 - \omega t) + A\sin(kd_2 - \omega t) = 2A\sin\left(\frac{k(d_1+d_2)}{2} - \omega t\right)\cos\frac{k(d_1-d_2)}{2}$$

Le mouvement résultant est donc sinusoïdal et son amplitude est : $2A\cos\dfrac{k(d_1-d_2)}{2}$. Deux cas peuvent alors être considérés :

Equation des lignes tempêtes : interférence constructive

Cette amplitude sera maximale, c'est-à-dire égal à $2A$, si le cosinus vaut ± 1.

$$\left|\frac{k(d_1-d_2)}{2}\right| = n\pi \text{ or } k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \boxed{|d_1 - d_2| = 2n.\frac{\lambda}{2}}$$

Où $(d_2 - d_1)$ est appelé la **différence de marche**.

Pour les points P qui vérifient cette équation, on peut dire qu'il y a superposition de deux vibrations en concordance de phase ; on dit qu'il y a interférence constructive (les ondes s'ajoutent).

Equation des lignes de repos : interférence destructive

Cette amplitude sera minimale, c'est-à-dire égal à zéro, si

$$\left|\frac{k(d_1-d_2)}{2}\right| = (2n+1)\pi \text{ or } k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \boxed{|d_1 - d_2| = (2n+1).\frac{\lambda}{2}}$$

Pour les points P qui vérifient cette équation, on peut dire qu'il y a superposition de deux vibrations en opposition de phase ; on dit qu'il y a interférence destructive (les ondes se détruisent).

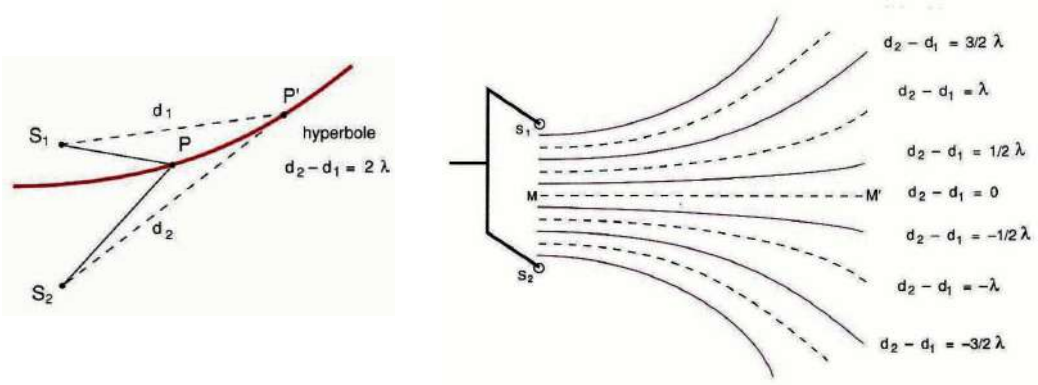


FIGURE 7.25 – (a) Les lignes de tempête et de les lignes de repos forment des paraboles dont les foyers sont les deux sources. (b) Quelques paraboles pour différentes valeurs de la différence de marche $|d_2 - d_1|$. Notons que la médiatrice MM' du segment S_1S_2 est une ligne de tempête pour laquelle $|d_2 - d_1| = 0$.

Les équations des lignes tempêtes et de repos sont des *équations d'hyperboles*[7] dont S_1 et S_2 sont les foyers. L'ensemble de ces lignes forme une figure d'interférences. (Voir figure 7.25).

L'étude des figures d'interférences permet la mesure de la longueur d'onde des ondes et par la suite la vitesse V de ces ondes. Retenons ce point important : *Une figure d'interférences est un critère pour détecter le caractère ondulatoire d'un phénomène.*

Exemple Soit la figure 7.26 où les sources S_1 et S_2 sont distantes de 18 cm. En S_1 et S_2, on produit des vibrations dont l'amplitude est de 1 cm et la fréquence 10 Hz.

1. Quelle est la vitesse des ondes ?
2. Soit un point P distant de S_1 et de S_2 de 34 cm. Déterminer l'amplitude de la vibration en P.
3. Même question pour un point Q distant de S_1 de 40 cm et de S_2 de 46 cm.
4. Même question pour un point R distant de S_1 de 30 cm et de S_2 de 45 cm.

Solution

1. En examinant la figure 7.26, on détermine qu'il y cinq lignes tempêtes (les traits pleins) entre S_1 et S_2. Autrement dit la distance S_1S_2 correspond à 5+1=6 demi longueur d'onde (il y a 6 intervalles entre S_1 et S_2) et on a alors : distance S_1S_2 correspond à 5+1=6 demi longueur d'onde (il y a 6 intervalles entre S_1 et S_2) et on a alors :
$$6 \times \frac{\lambda}{2} = 18 \;\Rightarrow\; \lambda = 6 \text{ cm} \;\Rightarrow\; v = \lambda.f = 6 \times 10 = 60 \text{ cm/s}$$
2. Le point P est situé sur la médiatrice de S_1S_2. Il est donc sur une ligne tempête et son amplitude est $2A = 2$ cm.

7. Une *hyperbole* est le lieux des points tels que la différence des distances à deux points fixes nommés foyers est constante. Une *ellipse* est le lieu des points tels que la somme des distances à deux points fixes (les foyers) est constante. Une *parabole* est le lieu des points situés à égal distance d'une droite (la directrice) et d'un point (le foyer).

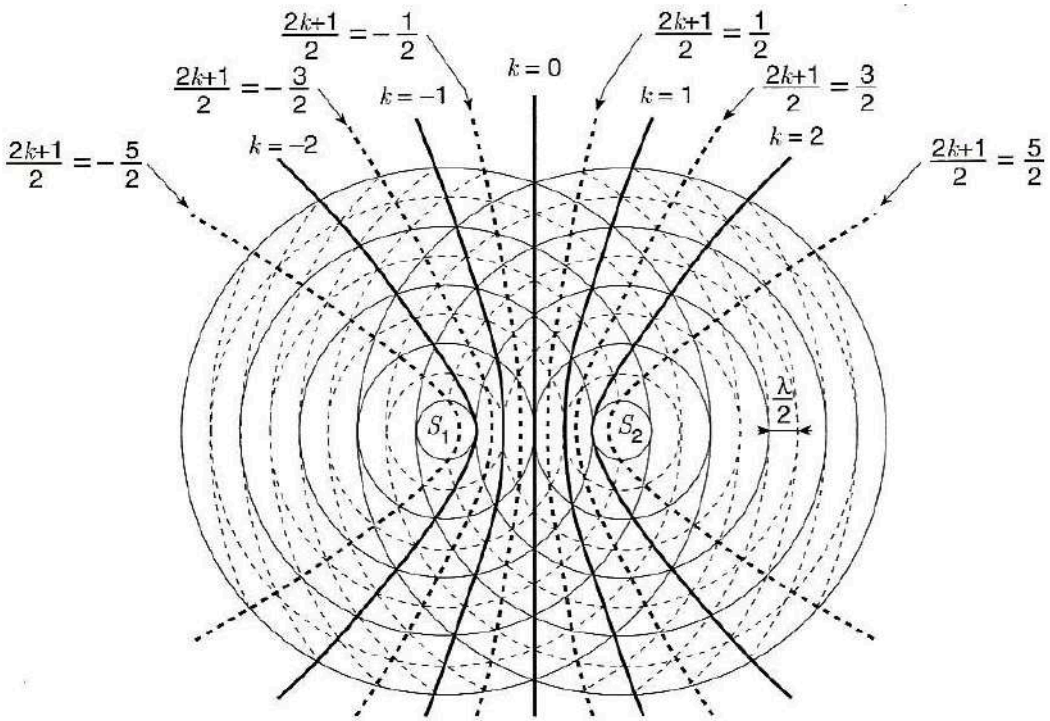


FIGURE 7.26 – Dans cette figure d'interférence, les lignes de tempêtes sont en traits pleins et les lignes de repos en traits pointillés. Les valeurs de $k \in Z$ détermine une ligne de tempête. Les valeurs de $(2k+1)/2$ qui sont des multiples de $1/2$ correspondent à des lignes de repos. De nouveau, nous noterons que la médiatrice de S_1S_2 correspondant à $k = 0$ est une ligne de tempête.

3. La différence de marche est $|d_2 - d_1| = 46 - 40 = 6 = 2 \times \frac{\lambda}{2}$. Q est donc aussi sur une ligne tempête et son amplitude vaut 2 cm.
4. La différence de marche est $|d_2 - d_1| = 45 - 30 = 15 = 5 \times \frac{\lambda}{2}$. R est donc sur une ligne de repos et $A = 0$.

7.10 Exercices

1. Figure 7.27 : deux perturbations représentées à un instant donné se croisent. Quelle sera l'élongation à cet instant des points A, B, C, et D ? (Utiliser la latte).

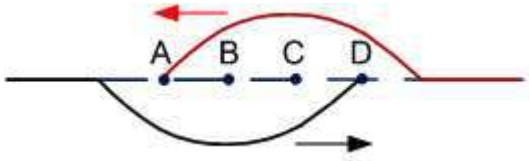


FIGURE 7.27 –

2. Figure 7.28 : tracer l'onde résultante des deux perturbations représentées pour chacun des schémas.

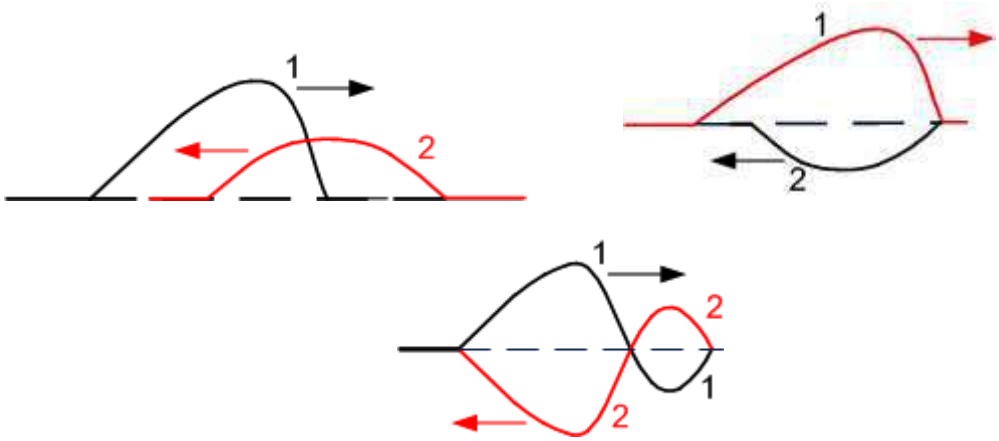


FIGURE 7.28 –

3. Une corde attachée à un vibreur est le siège d'un régime stationnaire, la distance entre deux noeuds successifs est de 20 cm.
   (a) Déterminer la longueur d'onde.
   (b) Si la fréquence du vibreur est de 50 Hz, quelle est la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde ?

   (Rép : (a) $\lambda = 0.4$ m ; (b) $v = 20$ m/s)

4. La vitesse de propagation d'un mouvement ondulatoire le long d'une corde de 1.50 m est de 30 m/s. Quelle est la fréquence de vibration :
   (a) Lorsqu'il y a un ventre au milieu de la corde et un noeud à chaque extrémité.
   (b) Lorsqu'on trouve deux ventres de vibrations entre les deux noeuds extrêmes ?

   (Rép : $f = 10$ Hz ; $f = 20$ Hz.)

5. Figure 7.29 : L'extrémité S du ressort est animée d'un mouvement harmonique. Sachant que l'autre extrémité peut osciller librement, déterminer l'équation de l'élongation du point P. Interpréter la relation d'amplitude en repérant la position des différents points noeuds et points ventres.

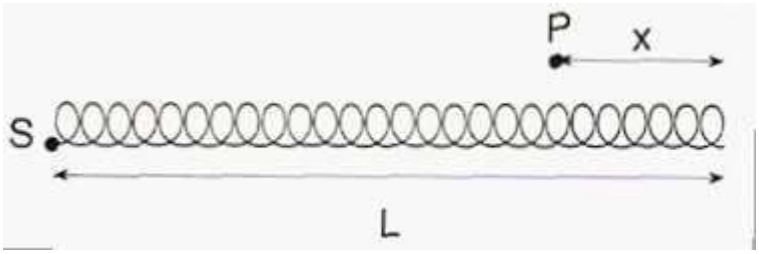


FIGURE 7.29 –

6. On produit des modes stationnaires sur une corde tendue aux deux extrémités et d'une longueur de 1.20 m (Voir figure 7.30)

Nombre de fuseaux	Fréquence (Hz)
2	62
3	92
4	125

FIGURE 7.30

(a) Déterminer la vitesse de ces ondes.

(b) Calculer la fréquence qui donnerait 7 fuseaux.

(Rép : (a) $v = 74$ m/s ; (b) $f = 216$ Hz.)

7. Figure 7.31 : Un tuyau en caoutchouc, fixé à ses deux extrémités, vibre en mode stationnaire avec 3 fuseaux pour une certaine fréquence. Parmi les 4 dessins (A, B, C ou D), le(s)quel(s) pourrai(en)t être une photographie instantanée de ce tuyau ?

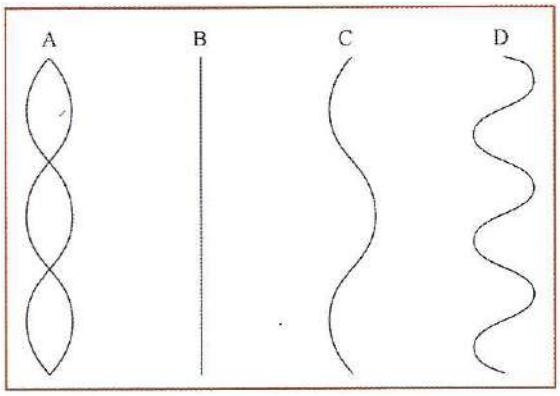


FIGURE 7.31 –

8. Une corde horizontale élastique longue de 6 m est fixée à l'une de ses extrémités. De l'autre extrémité se propage un mouvement sinusoïdal transversal de fréquence valant 10 Hz. Elle est alors le siège d'un système d'ondes stationnaires. Entre les deux extrémités , celles-ci n'étant pas comprises, on note l'existence de cinq noeuds. Déterminer la vitesse des mouvements vibratoires incident et réfléchi le long de la corde.
(Rép : 20 m/s.)

9. On réalise des ondes stationnaires sur une corde. La distance entre deux noeuds consécutifs est de 40 cm. Déterminer la longueur d'onde des ondes qui se propagent le long de la corde et leur vitesse, sachant que la fréquence des vibrations entretenues est de 100 Hz.
(Rép : 80 cm ; 80 m/s.)

10. Quelle pourrait être la longueur d'une boîte, ouverte sur une seule de ses faces, pour qu'elle puisse servir de caisse de résonance pour un diapason de 440 Hz ?
(Rép : $L = 19.3$ cm.)

11. La corde "si" d'une guitare est fixée à ses deux extrémités avec une longueur vibrante de 33 cm, et sous une certaine tension, elle vibre à sa fréquence fondamentale de 246 Hz. Quelle est la longueur d'onde produite sur la corde ? Pourrais-tu produire un son d'une autre fréquence sur la même corde ? Si oui, détermine une fréquence possible.

12. Une corde est attachée par l'une de ses extrémités à l'une des branches d'un diapason qui vibre avec une fréquence de 200 Hz. L'autre extrémité de la corde est fixe. La longueur de la corde est de 1.5 m. On ajuste sa tension de manière à obtenir des ondes stationnaires présentant 3 ventres. Quels sont le nombre de noeuds et la vitesse des vibrations le long de la corde ?
(Rép : 240 m/s.)

13. On produit un système d'ondes stationnaires avec des ondes acoustiques de fréquence 850 Hz. On constate que deux noeuds consécutifs sont distants de 20 cm. Déterminer la vitesse du son dans le milieu où se propagent les ondes. (Rép : 340 m/s.)

14. Une trompette est essentiellement un tube courbé d'environ 140 cm de long, ouvert à une extrémité, et fermé par la bouche du musicien. Détermine la fréquence du fondamental (difficile à exciter) et des trois harmoniques suivantes.

15. Un tube étroit en verre de longueur 50 cm est fermé à son extrémité inférieure et tenu verticalement juste en-dessous d'un haut-parleur relié à un ampli et un générateur de sons purs. Un son de fréquence progressivement croissante est alors émis et une première résonance est obtenue à 170 Hz. Quelle est la vitesse du son dans cette pièce.

16. Un tube vertical de 3 m de long peut être rempli d'eau jusqu'à n'importe quel niveau. Le son qui entre par l'extrémité ouverte du tube est réfléchi à la surface de l'eau, ce qui entraîne à cet endroit la formation d'un noeud.
    (a) Si le tube est rempli d'eau jusqu'à un niveau de 1 m, quelle est la fréquence de résonance la plus basse ?
    (b) Quelle est la hauteur d'eau si la fréquence de résonance la plus basse est 500 Hz ?

17. Un tube en caoutchouc de 10 m de longueur est tendu horizontalement. On fait vibrer l'une des extrémités à la fréquence de 10 Hz. On constate que sur la longueur du tube se forment 9 noeuds de vibration (sans tenir compte du noeud à l'extrémité fixe). Calculer la vitesse du mouvement ondulatoire dans le tube.
(Rép : 21 m/s).

18. Un fil d'acier a une longueur de 0,41 m. L'une des extrémités est fixe tandis qu'à l'autre on applique un mouvement vibratoire de fréquence égale à 100 Hz. On ob-

serve trois ventres de vibration. Quelle est la vitesse des ondes dans le fil ?
(Rép : 27.3 m/s.)

19. On suscite des ondes stationnaires longitudinales dans un ressort à boudin. La source vibrante a une fréquence de 100 Hz. La distance entre deux noeuds de vibration successifs est de 6 cm. Calculer la longueur d'onde et la vitesse des ondes.
(Rép : 12 cm ; 12 m/s).

20. La vitesse du mouvement vibratoire dans une corde de 0.45 m est de 300 m/s. Quelle est la fréquence des vibrations :
    (a) Lorsqu'il y a un ventre de vibration au milieu de la corde et un noeud à chacune des extrémités ?
    (b) Lorsqu'on trouve deux ventres de vibrations entre les noeuds extrêmes ?
    (Rép : (a) 333 Hz ; (b) 667 Hz.)

21. Un tube vertical de 50 cm de long est rempli d'eau. Un haut-parleur de fréquence 100 Hz est placé devant l'ouverture du tube. On fait descendre lentement l'eau dans le tube. Pour quelles hauteurs de la colonne d'air obtient-on un son d'intensité maximale ?
(Rép : 8.5 cm ; 25.5 cm ; 42.5 cm.)

22. La vitesse de propagation des ondes transversales le long d'une corde dépend de
– la force exercée sur la corde F_t
– la masse par unité de longueur de la corde
selon la formule :
$$v = \sqrt{\frac{F_t}{\mu}}$$
Un vibreur oscillant à la fréquence de 100 Hz, crée des ondes transversales le long d'une corde fixée à ses deux extrémités ; celle-ci est soumise à une force de tension 1.43 N. Si la longueur du fil est de 3 m, déterminer la vitesse de propagation des ondes si on observe six fuseaux le long de la corde. Calculer la masse par unité de longueur du fil.
(Rép : 100 m/s ; 1.43×10^{-4} kg/m)

23. Un point P est soumis à des oscillations transversales. Ce point P se trouve à une distance x d'une extrémité fixée, la source se trouvant à l'autre extrémité. L'équation de l'élongation du point P est donnée par la relation :
$$y_P = 0.5 \sin \frac{\pi x}{3} \cos (40\pi t - \pi)$$
x et y en cm, t en s. La longueur de la corde vaut 6 m.
Déterminer :
    (a) L'amplitude de la source ;

(b) La vitesse de propagation des ondes transversales ;

(c) La distance entre les noeuds ;

(d) La vitesse de déplacement du point ayant pour valeur de $x = 1.5$ cm à l'instant $t = 9/8$ s.

(Rép : (a) $A = 0.25$ cm ; (b) 1.2 m/s ; (c) 3 cm ; (d) 0)

24. Soit une corde de 2 m de long, que l'on fait vibrer avec une fréquence de 100 Hz, calculer la masse par unité de longueur et la longueur d'onde,

(a) si la force est de 3.48 N et le nombre de fuseaux est égal à trois ;

(b) si la force est de 0.4 N et le nombre de fuseaux est égal à neuf.

(Rép : environ 2×10^{-4} kg/m)

25. En utilisant la formule :

$$y_P(t) = 2A \sin kx \cos \omega t$$

Retrouver les conditions d'amplitude a) maximale ; b) nulle.

26. Un corde de longueur 1.0 m, fixée à ses deux extrémités, est le siège d'un système d'ondes stationnaires. Elle vibre en présentant cinq fuseaux.

(a) Calculer la distance entre deux ventres de vibration consécutifs ?

(b) Sachant que la vitesse de propagation de l'onde le long de la corde a pour valeur 10 m/s, calculer la fréquence du mouvement vibratoire.

(c) A est un point de la corde situé à 30 cm d'un ventre de vibration. A est-il un ventre ou un noeud de vibration ? Justifier.

(d) On fait varier la fréquence de 5,0 Hz et on constate que la corde est toujours le siège d'un système d'ondes stationnaires mais elle présente moins de fuseaux que précédemment

i. A-t-on augmenté ou diminué la fréquence des vibrations ? Justifier.

ii. Déterminer le nombre de fuseaux dans ce cas.

(e) La fréquence du vibreur qui excite la corde peut prendre les valeurs f avec 20 Hz $\leq f \leq$ 50 Hz. Pour quelles valeurs de f le corde peut-elle être le siège d'un système d'ondes stationnaires ?

27. Dans une pièce à 15°C, on dispose un tube cylindrique de 50 cm de long et de 4 cm de diamètre ouvert à une de ses extrémités et fermé à l'autre. En face de l'ouverture, on place un haut-parleur relié à un générateur de fréquence. A cette température la vitesse de propagation du son est de 340 m/s.

(a) Quelle fréquence doit-on sélectionner sur le générateur pour que le tube entre en résonance dans un mode stationnaires où trois ventre d'oscillation sont présents ?

(b) Est-il possible de mettre en évidence dans une autre expérience une résonance sonore entre ce tube et un des modes stationnaires d'une corde de guitare deux fois plus courte que le tube et dont la vitesse de propagation des ondes est de 170 m/s ?

Rép : (a) 850 Hz ; (b) Aucune résonance n'est possible car pour la corde les modes stationnaires ont pour fréquences les multiples pairs de 170 Hz et pour le tube ce sont les multiples impairs de 170 Hz.

28. Figure 7.32. On photographie les interférences produites dans une cuve à onde par deux sources S_1 et S_2. Pour faire apparaître clairement les lignes de repos et les lignes de tempêtes, cette photo n'est pas un instantané mais le résultat de l'observation du phénomène durant une durée donnée et à une fréquence de l'ordre de 20 Hz. Déterminer la longueur d'onde sachant que la distance entre S_1 et S_2 est de 6 cm.

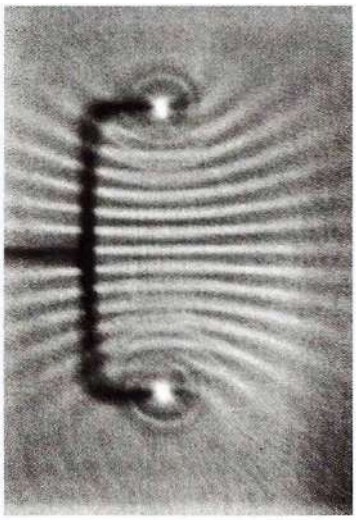


FIGURE 7.32 –

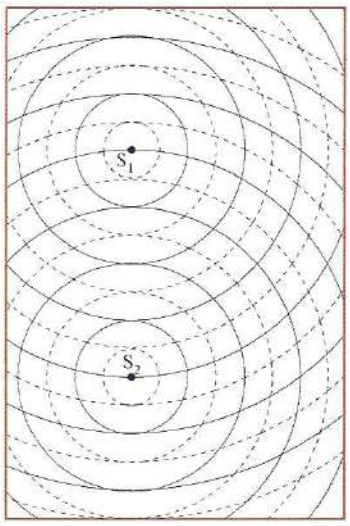


FIGURE 7.33 –

29. Deux sources S_1 et S_2 émettent des ondes circulaires à la surface de l'eau. Dans la figure 7.33
– les cercles en traits pleins représentent les " crêtes " d'eau à un instant donné.
– les cercles en traits discontinus représentent les " creux " d'eau au même instant.
Quelle sera l'amplitude d'un point P :
– à l'intersection de deux cercles en traits pleins.
– à l'intersection de deux cercles en traits discontinus.
– à l'intersection d'un cercle en trait plein et d'un cercle en traits discontinus.

30. Figure 7.34

(a) Si au point L_1, d'une cuve à ondes, deux crêtes se superposent à un instant donné, déterminer l'état de vibration de l'eau en ce même point une demi période plus tard.

(b) L'élongation de L_2 de la cuve à ondes est nulle à l'instant représenté. Déterminer l'état de vibration de l'eau en ce point une demi-période plus tard.

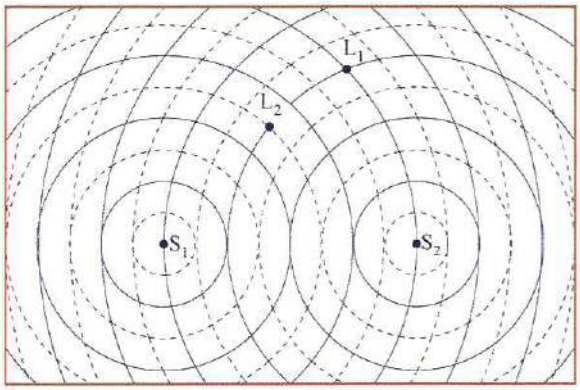


FIGURE 7.34 –

31. Un point P d'une nappe est situé à 16 cm de S_1 et à 20 cm de S_2. La vitesse des ondes est de 0.8 m/s et la période T des deux sources est de 0.02 s. Quelle est l'amplitude des oscillations de l'eau en P ?
(Rép : Amplitude nulle.)

32. A l'aide d'un vibreur, on produit en deux points S_1 et S_2 d'une nappe liquide distants de 9 cm, des vibrations transversales sinusoïdales de même amplitude, en concordance de phase et de fréquence 20 Hz. La vitesse de propagation des rides circulaires produites par chacune des sources est de 40 cm/s. On suppose que dans la région considérée on peut négliger la diminution de l'amplitude avec la distance.
    (a) Déterminer la longueur d'onde des ondes produites.
    (b) En prenant comme origine le milieu O du segment S_1S_2, déterminer l'abscisse x des points du segment S_1S_2 où l'amplitude est maximale.
    (c) Celle des points au repos.

    (Rép : (a) 0.02 m ; (b) $x = 1, 2, 3, 4$; (c) $x = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5$.)

33. A l'aide d'un vibreur, on produit en deux points S_1 et S_2 des vibrations dont l'amplitude vaut 1 cm et la fréquence 10 Hz. La vitesse des ondes est de 50 cm/s.
    (a) Déterminer la longueur d'onde.
    (b) Quelle sera l'amplitude d'un point de la nappe d'eau situé à 20 cm de S_1 et à 30 cm de S_2 ?
    (c) Même question si les distance sont respectivement de 22 et 21 cm.
    (d) Calculer la différence de marche $d_2 - d_1$ pour que l'amplitude de P soit 1.41 A, sachant que :

$$A_P = \left| \, 2A \cos \pi \frac{d_2 - d_1}{\lambda} \, \right|$$

(Rép : (a) $\lambda = 5$ cm ; (b) $A_P = 2$ cm ; (c) $A_P = 1.62$ cm ; (d) $d_2 - d_1 = 1.25$ cm.)

34. La figure 7.35 représente les lignes de repos lors d'une expérience d'interférence d'ondes émises par les sources S_1 et S_2. Déterminer la longueur d'onde sachant que la figure est à l'échelle 1 :1.

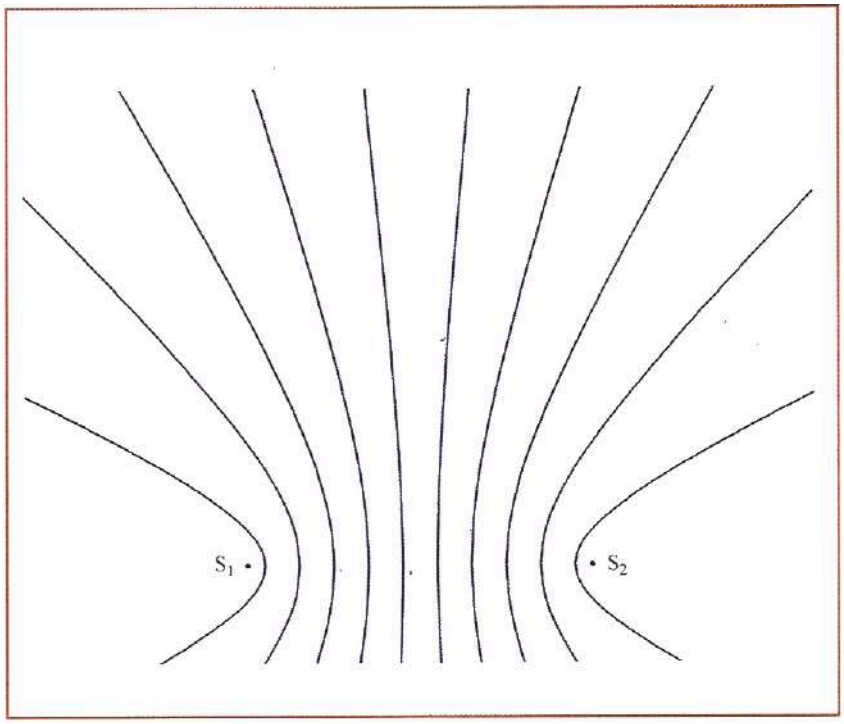


FIGURE 7.35 –

35. Lors d'une expérience d'interférences dans une cuve à ondes, indiquer si un des changements suivants :
– absence ou présence de lignes de lignes de repos
– changement du nombre de lignes de repos
– autres changements
se produit lors de chacune des modifications suivantes :

(a) la fréquence des émetteurs est augmentée ;

(b) la distance entre émetteurs est augmentée ;

(c) la profondeur de l'eau est augmentée ;

(d) l'amplitude des deux émetteurs est augmentée de la même façon ;

(e) l'amplitude d'un des émetteurs est grande, celle de l'autre est petite ;

(f) les deux émetteurs, au lieu de vibrer en concordance de phase, vibrent en opposition de phase.

36. Deux sources ponctuelles S_1 et S_2 émettent des ondes circulaires de même amplitude et de même fréquence. Cependant, les sources vibrent en **opposition de phase**.
    – Quelle est l'amplitude d'un point P de la nappe d'eau situé à une distance d_1 de la première source et à une distance d_2 de la seconde source, lorsque :
      (a) le retard de la seconde onde par rapport à la première est nul.
      (b) ce retard est un nombre pair de périodes.
      (c) ce retard est un nombre impair de demi-périodes.

      Répondre en traçant le graphique de y_P en fonction du temps pour chaque cas.
    – Trouver l'expression mathématique de $y_P(t)$ et de l'amplitude A_P pour un point P quelconque.

    (Rép : (b) $A_p = \left| 2A\cos\left[\frac{\pi(d_2-d_1)}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right] \right|$)

37. Deux sources synchrones ont pour fréquence 50 Hz. Leurs vibrations se propagent à la vitesse de 12 m/s.
    (a) déterminer la longueur d'onde.
    (b) déterminer l'état vibratoire d'un point situé à 25 cm de la première source et à 37 cm de la seconde source.

    (Rép : (a) 0.24 mm ; (b) repos.)

38. Deux sources de vibrations S_1 et S_2 distantes de 20 cm vibrent en concordance de phase. Leur élongation exprimée en mm est donnée par la relation :

$$y = 2\sin(100\pi t)$$

    (a) déterminer la fréquence des vibrations.
    (b) la longueur d'onde des ondes qui se propagent avec la vitesse de 50 cm/s.
    (c) l'équation du mouvement résultant en un point P distant de S_1 et S_2 respectivement de 12 et 10 cm.

    (Rép : (a) 50 Hz ; (b) 1 cm ; (c) $y = 4\sin(100\pi t)$.)

39. Dans une cuve à ondes, des vibreurs ont une fréquence de 50 Hz, le mouvement de S_1 à une amplitude de 1 cm et le mouvement de S_2 une amplitude de 1.5 cm. Les ondes se propagent à 10 cm/s.
    (a) Calculer la longueur d'onde ;
    (b) En tenant compte uniquement de S_1 :
        i. Quelle est l'équation du mouvement vibratoire d'un point X situé à 8.5 cm de S_1 ?
        ii. Quelle est l'équation du mouvement vibratoire d'un point Y situé à 9 cm de S_1 ?
        iii. Quel est le déphasage entre X et S_1 ?
        iv. Quel est le déphasage entre Y et S_1 ?

v. Quel est le déphasage entre X et Y ?

(c) Ecrire l'équation des mouvements vibratoires des points suivants :

i. M situé à 7 cm de S_1 et 6 cm de S_2

ii. N situé à 6.5 cm de S_1 et 10.5 cm de S_2

iii. O situé à 20 cm de S_1 et 32.5 cm de S_2

iv. P situé à 4 cm de S_1 et 10 cm de S_2

v. Q situé à 8.5 cm de S_1 et 6 cm de S_2

Réponses :

(a) $\lambda = 0.02\text{m}$

(b) (i) $y_X(t) = 0.01\sin(10\pi t - \pi/2)$

(ii) $y_P(t) = 0.01\sin(10\pi - \pi)$

(iii) En quadrature

(iv) En opposition

(v) En quadrature

(c) (i) $y_M(t) = 0.005\sin(10\pi t)$

(ii) $y_N(t) = 0.025\sin(10\pi t - \pi/2)$

(iii) $y_O(t) = 0.018\sin(10\pi t - 0.98)$

(iv) $y_P(t) = 0.025\sin(10\pi t)$

(v) $y_Q(t) = 0.018\sin(10\pi t - 0.59)$

40. Une paire de haut-parleurs en concordance de phase sont placés à 60 cm l'un de l'autre. Vous vous tenez directement en face d'un des haut-parleurs à 1 m de distance. Quelle est la plus petite fréquence qui va produire des interférence à cet endroit ?
(Rép : 2 Khz.)

41. Deux haut-parleurs séparés de 2 m sont alimentés par un signal de 688 Hz qui les fait vibrer en phase. Un micro est placé en un point situé à 6.75 m de l'un et 7 m de l'autre. Que peux-tu dire de l'intensité reçue par le micro lorsque les deux haut-parleurs émettent (vitesse du son 344 m/s) ?

42. Deux haut-parleurs identiques A et B sont alimentés par un générateur basse fréquence dont on peut faire varier la fréquence de 1500 à 1600 Hz, l'intensité restant constante. Ils se comportent comme deux sources sonores en concordance de phase. Un observateur place son oreille à 6 m de A et à 10 m de B. Montrer que lorsque la fréquence augmente lentement de 1500 à 1600 Hz, l'observateur perçoit un maximum et un minimum pour deux valeurs particulières de la fréquence et déterminez ces valeurs. (Vitesse du son 340 m/s)
(Rép : 1530 Hz et 1570 Hz.)

43. On réalise une expérience d'interférences sonores. Deux haut-parleurs S_1 et S_2, distants de 2.50 m, émettent en phase des ondes sonores sinusoïdales de même amplitude et de même fréquence égale à 425 Hz. On suppose une vitesse du son de 340 m/s

(a) Calculer la longueur d'onde ;

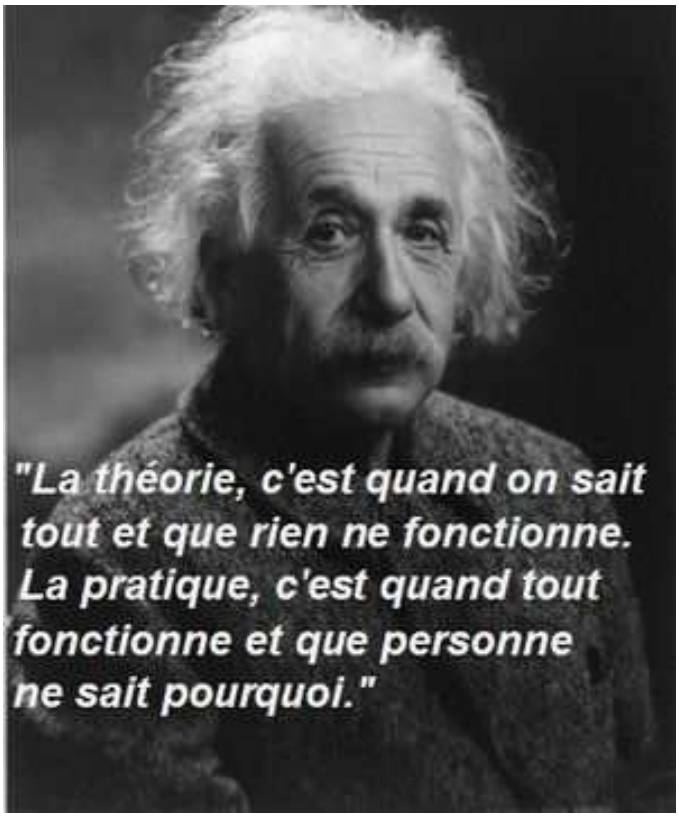
(b) P est un point distant de 2.70 m de S_1 et de 3.10 m de S_2. P est-il sur une ligne de tempête ou de repos ou sur aucune de ces lignes caractéristiques de la figure d'interférence ?

(c) Dites en justifiant votre réponse combien de lignes de repos sont présentes entre les deux sources ;

(d) En partant tout près de S_1, et en s'éloignant à la perpendiculaire de la droite joignant les deux sources, à quelle distance doit-on s'éloigner de ce haut parleur pour croiser une première fois une ligne de repos ?

(Rép : (a) 0.8 m ; (b) Première ligne de repos du côté de S_1 ; (c) 6 ; (d) 0.56 m.)

44. Deux haut-parleurs sont placés aux deux extrémités d'une salle de sport, et pointent tous deux vers le centre de la salle. Ils émettent en phase un son grave de 256 Hz. Un observateur se trouve au centre de la salle et y perçoit des interférences constructives et donc un son fort. De quelle distance doit-il s'avancer vers une des sources pour percevoir une interférence destructive (forte diminution du son perçu) ? Dans ce problème, la distance diminue-t-elle, augmente-t-elle ou reste-t-elle la même si la fréquence des haut-parleurs est baissée ?
(Rép : 33 cm).


"La théorie, c'est quand on sait
tout et que rien ne fonctionne.
La pratique, c'est quand tout
fonctionne et que personne
ne sait pourquoi."

Chapitre 8

L'effet Doppler

8.1 Définition

Chaque sorte d'onde se propage dans un milieu homogène à vitesse constante, qui dépend uniquement des propriétés physiques du milieu. Cela est vrai quel que soit le mouvement de la source : elle émet l'onde qui se propage. Cependant, la perception de la fréquence d'une onde et de sa longueur d'onde peut être modifiée considérablement par un mouvement relatif entre l'observateur et la source. (Voir figure 8.1)

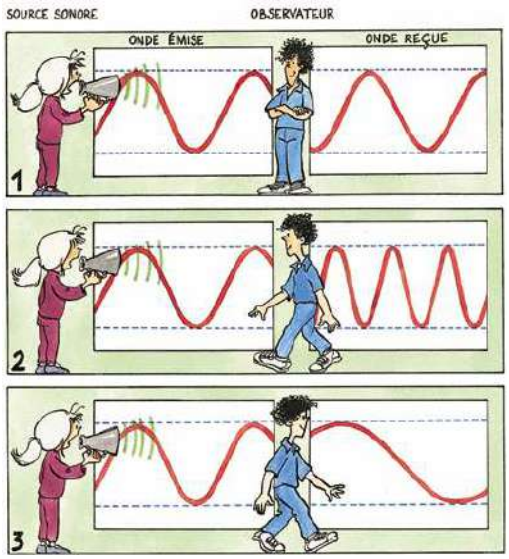


FIGURE 8.1 – (a) Lorsque la source et l'observateur sont immobile, la fréquence du son perçu par l'observateur est égale à la fréquence du son émit par la source. (b) Si l'observateur se rapproche de la source, il perçoit une fréquence plus élevée, donc un son plus aigu. (c) Si l'observateur s'éloigne de la source, il perçoit une fréquence plus basse donc un son plus grave.

Lorsque dans une course automobile, les voitures passent devant nous, nous entendons clairement le bruit du moteur d'abord aigu, puis grave lorsqu'elles nous ont dépassés. Ce phénomène est très perceptible aussi avec un avion ou même une ambulance. Cet effet se superpose à la variation d'intensité du bruit. La fréquence ou la hauteur est plus élevée lorsque l'ambulance s'approche.

Cet effet fut découvert en 1842 par Christian Doppler à propos des ondes sonores et puis par Fizeau en 1848 à propos des ondes lumineuses.

On appelle **effet Doppler (Fizeau)** : **La modification de la fréquence du son perçu due au mouvement de la source ou de l'observateur ou des deux à la**

fois. Le son est plus aigu si la source s'approche de l'observateur, plus grave si la source s'éloigne de l'observateur.

FIGURE 8.2 – Johann Christian Doppler (1803 - 1863) est un physicien et un mathématicien autrichien qui est le plus souvent connu pour sa découverte de l'effet Doppler. Cet effet est central dans les conceptions modernes du bruit et de la lumière. Les premiers travaux de Doppler concernent les mathématiques, mais en 1842 il publie un article sur la lumière colorée des étoiles doubles et de certaines autres étoiles. Dans ce travail, il propose que la fréquence observée de la lumière et des ondes sonores dépend de la façon dont l'observateur se déplace par rapport à la source. Ce phénomène est généralement désigné sous le nom d'effet Doppler. Il a également correctement prévu que sa théorie serait un jour utilisée par les astronomes pour la mesure des mouvements et des distances entre les étoiles. Notamment, les mouvements des étoiles détectées de cette façon ont mené au développement de la grande théorie du " Big bang " de l'univers.

FIGURE 8.3 – Hippolyte Fizeau, physicien français (1819 - 1896). En 1848, il découvre le décalage de fréquence d'une onde lorsque la source et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre[1] (effet Doppler-Fizeau). C'est ainsi qu'il prédit le décalage vers le rouge des ondes lumineuses. En 1849, il travaille sur les interférences et détermine pour la première fois la vitesse de la lumière de manière terrestre (expérience de Fizeau). Il met au point une méthode de mesure de la vitesse de la lumière utilisant une roue dentée tournant à vitesse constante sur laquelle se réfléchit une source lumineuse. La distance utilisée entre la source et la roue est proche de 8 633 m entre le mont Valérien à Suresnes et Montmartre. Cela lui donne une valeur pour la vitesse de la lumière proche de 315 300 km/s. En 1850, il mesure la vitesse de l'électricité. En 1853, il a l'idée d'ajouter un condensateur aux bobines utilisées pour générer des tensions électriques très élevées.

8.2 Formule

La figure 8.4 montre cinq positions successives de la source et les fronts d'onde correspondants. Supposons qu'à l'instant $t = 0$, la source était au point 0. Si la vitesse de la source est v_S, à l'instant t, elle s'est déplacée d'une distance $v_S.t$, Comme sa fréquence est f_s, le nombre d'ondes qu'elle a émise est $f_S.t$. En se propageant à la vitesse du son v, le front émis à l'instant $t = 0$ est une sphère de rayon $v.t$, où il rencontre l'observateur. La longueur d'onde λ du côté de l'observateur est le quotient de la distance entre la source $v.t + v_S.t$ et l'observateur par le nombre d'ondes $f_S.t$:

$$\lambda = \frac{vt + v_S t}{f_S t} = \frac{v + v_S}{f_S}$$

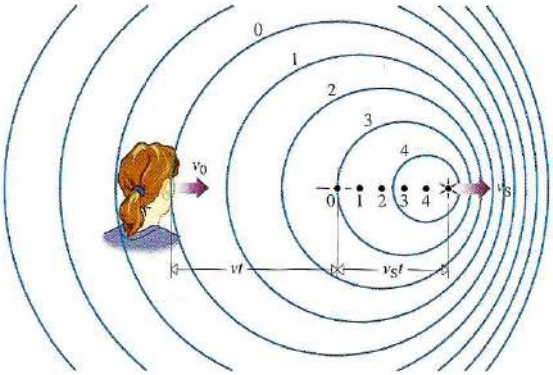


FIGURE 8.4 – La source à droite se déplace vers la gauche à une vitesse v_S, prise positive. L'observateur se déplace aussi vers la droite avec une vitesse v_O qui est positive aussi.

L'observateur se déplace vers la droite à la vitesse v_O. et il reçoit les fronts d'onde à une vitesse $v + v_O$. Par conséquent, il perçoit une fréquence :

$$f_O = \frac{v + v_O}{\lambda}$$

On a alors

$$\lambda = \frac{v + v_S}{f_S} = \frac{v + v_O}{f_O}$$

En conclusion :

$$\boxed{f_O = \frac{v + v_O}{v + v_S} . f_S} \tag{8.1}$$

Note importante . Dans la formule 8.1.
- Le sens positif est définit de l'observateur *vers* la source ;
- donc v_S est positive dans le sens observateur $\longrightarrow$ source. Autrement dit, la source **s'éloigne** de l'observateur ;
- et donc v_O est positive dans le sens observateur $\longrightarrow$ source. Autrement dit, l'observateur **se rapproche** de la source.

Exemple Une voiture roule à 20.0 m/s et émet un son de sirène de fréquence 600 Hz. Déterminer la fréquence perçue par un observateur immobile pendant que la voiture s'approche et pendant qu'elle s'éloigne. Prendre la vitesse du son à 340 m/s.

Solution On a donc ici : $v_O = 0$. Lorsque la voiture s'approche $v_S = -20$ m/s et quand elle s'éloigne $v_S = +20$ m/s.
La voiture s'approche :

$$f_O = \frac{v f_S}{v + v_S} = \frac{340 \times 600}{340 + (-20)} = 638 \text{ Hz}$$

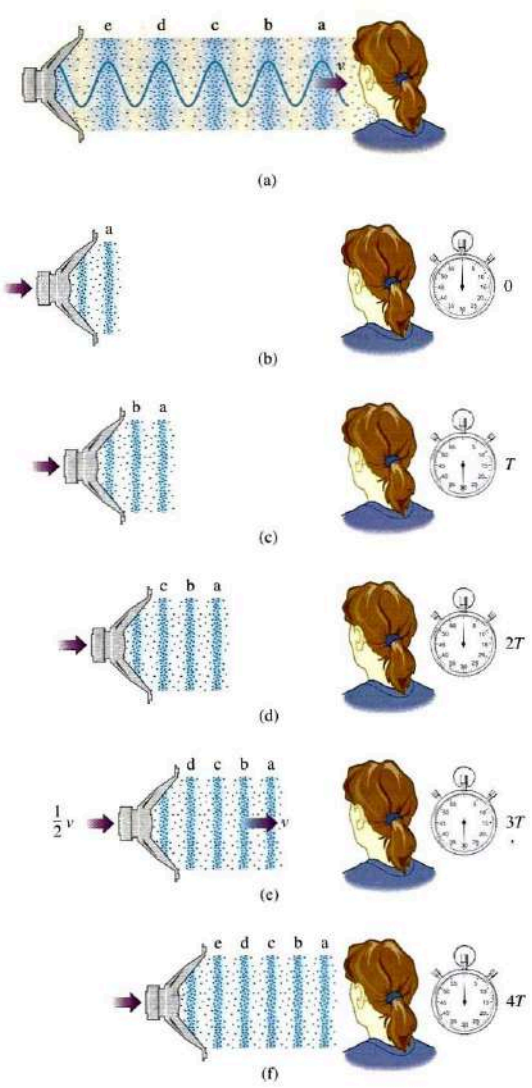


FIGURE 8.5 – Effet Doppler dans le cas d'une source qui se déplace vers un observateur immobile à une vitesse égale à la moitié de la vitesse du son (v). Comparer la longueur d'onde dans (a), où la source est au repos, à la longueur d'onde dans (f), où elle se déplace à la vitesse $1/2\ v$. Noter que la source avance de $1/2\ \lambda$ pendant l'émission d'une onde complète.

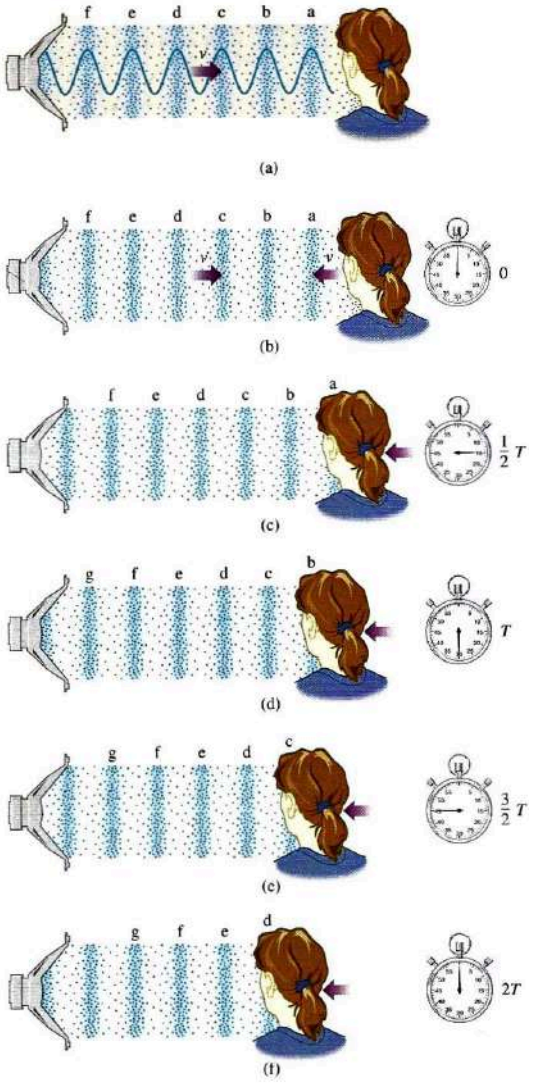


FIGURE 8.6 – Effet Doppler dans le cas d'un observateur qui se déplace vers une source immobile à une vitesse égale à la vitesse du son v. Noter comment l'observateur reçoit les fronts d'onde a,b,c et d pendant un temps égal à deux périodes. Si l'observateur était immobile comme dans (a), il aurait reçu seulement deux fronts d'onde a et b pendant ce temps, soit deux fois moins (son à l'octave inférieure).

La voiture s'éloigne :

$$f_O = \frac{v f_S}{v + v_S} = \frac{340 \times 600}{340 + 20} = 567 \text{ Hz}$$

L'effet Doppler est un effet qui est observé pour toutes les ondes y compris les ondes électromagnétiques.

D'une manière simple retenons que la fréquence du son reçu est une fonction de la

vitesse de l'observateur et de l'émetteur. Si des ondes émises par un objet immobile se réfléchissent sur une cible en mouvement, cette cible se comporte comme une source d'ondes. L'effet Doppler résultant, qui est le décalage de la fréquence réfléchie comparée à la fréquence émise, permet de déterminer la vitesse de la cible.

Exemple Une onde sonore de 1000 Hz est émise par un émetteur vers une cible qui s'approche. Si l'onde réfléchie à une fréquence de 1200 Hz, quelle est la vitesse de la cible ? Prendre la vitesse du son égale à 332 m/s. (Voir figure 8.7).

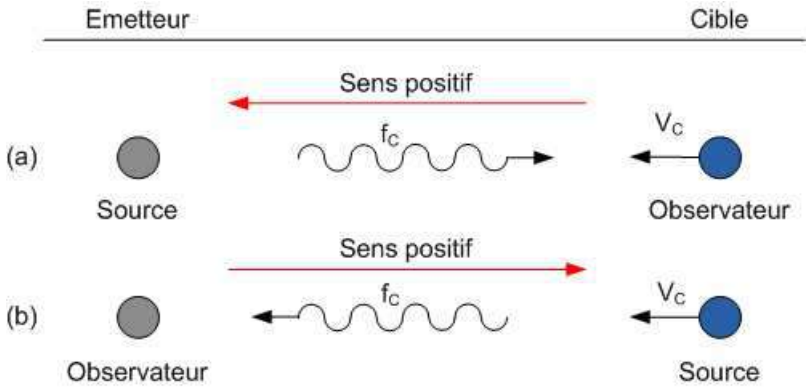


FIGURE 8.7 – (a) L'émetteur est la source, la cible est l'observateur, v_C est dans le sens positif. (b) La cible est la source, l'émetteur est l'observateur, v_C est dans le sens négatif.

Solution On a ici deux effets Doppler superposés. L'onde reçue par la cible est décalée à f_C, à cause du mouvement de la cible. Une onde est ensuite émise avec la fréquence f_C, l'observateur la reçoit décalée à f_O, de nouveau à cause du mouvement de la cible, qui joue maintenant le rôle d'une source.
Calculons d'abord f_C. La cible joue le rôle de l'observateur ($f_C = f_O$), dont la vitesse est nulle ($v_S = 0$). La fréquence reçue par la cible est obtenue en appliquant la formule 8.1 et en tenant compte que v_C est dans le sens positif définit par observateur $\longmapsto$ source :

$$f_C = \frac{(v + v_C)}{v}.f_S$$

Calculons maintenant f_O. L'onde de fréquence f_C est réfléchie. La cible joue le rôle d'une source, qui s'approche de l'observateur. Nous avons alors en tenant compte que maintenant v_C est dans le sens négatif :

$$f_O = \frac{f_C.v}{v - v_C}$$

Ce qui donne :

$$f_O = \frac{v}{v - v_C}.\frac{v + v_C}{v}.f_S \Rightarrow f_O = \frac{v + v_C}{v - v_C}.f_S \tag{8.2}$$

Pour déduire la vitesse en fonction des fréquences, il suffit de modifier la formule 8.2.

$$f_O(v - v_C) = f_S(v + v_C) \Rightarrow v_C(f_O + f_S) = v(f_O - f_S) \Rightarrow v_C = \frac{f_O - f_S}{f_O + f_S}.v$$

En remplaçant :

$$v_C = \frac{200}{2200} \times 332 = 30.2\text{m/s}$$

8.3 Application

8.3.1 Détection des objets en mouvement

Un détecteur émet une onde de fréquence f. Celle-ci se réfléchit sur un objet en mouvement. La fréquence f' de l'onde réfléchie est différente de f et le récepteur réagit en émettant un signal. Cette technique est largement utilisée dans les systèmes de sécurité anti-intrusion et antivol. (Voir figure 8.8)

FIGURE 8.8 – Détecteur de mouvement à infrarouge. Il fonctionne avec la réception des rayons infrarougesnémis par le corps ce qui permet des détections de jour et de nuit.

8.3.2 Radar pour déterminer la vitesse d'une auto

L'onde électromagnétique (micro-ondes de 8MHz) de vitesse c utilisée par le radar est réfléchie par la voiture en mouvement. Comme nous l'avons vu à l'exemple de la page 169, l'ordianteur peut facilement calculer la vitesse du véhicule à partir de la différence entre la fréquence de l'onde émise et celle de l'onde reçue en retour. qui a réfléchi l'onde. (Voir figure 8.9)

FIGURE 8.9 – L'effet Doppler peut servir à mesurer la vitesse d'une voiture ou d'une moto. Dans un radar routier, ce ne sont pas des ultrasons, mais des ondes électromagnétiques, situées dans le domaine des micro-ondes qui sont envoyées en direction des véhicules dont on contrôle la vitesse.

8.3.3 Cardiologie

L'effet Doppler peut être utilisé dans le domaine des ultrasons. (Voir figure 8.10). Quand un faisceau ultrasonique traverse un flux sanguin, la fréquence du signal revenant à l'émetteur peut être augmentée ou diminuée, en fonction de la direction et de la vitesse de ce flux par rapport à l'incidence du faisceau ultrasonique. Un mouvement liquidien

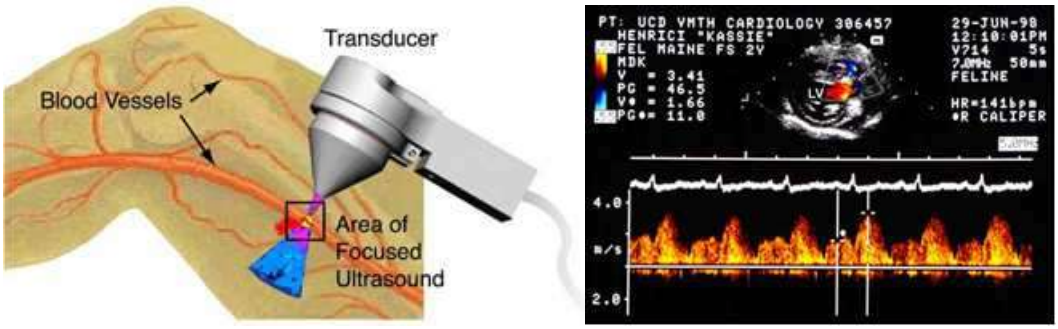


FIGURE 8.10 – (a) Mesure du flux sanguin dans une veine par effet Doppler. (b) Mesure du flux sanguin au niveau du coeur par Doppler.

vers la sonde élèvera la fréquence de retour, tandis qu'un mouvement s'en éloignant en diminuera la fréquence. L'amplitude du changement de fréquence est proportionnelle à la vitesse du flux sanguin ainsi qu'à l'angle entre le faisceau ultrasonique et le vaisseau analysé. Ainsi, on peut déterminer la vitesse et le sens d'un flux sanguin dans une région précise du thorax, cavité cardiaque ou vaisseau.

Le doppler permet donc de déterminer la vitesse et le sens d'un flux sanguin, ainsi que son caractère, homogène (ou laminaire) ou turbulent. Si l'on considère un flux sanguin au niveau d'une valve par exemple, l'on pourra aisément déterminer à partir des vitesses, le gradient de pression entre les cavités situées de part et d'autre de cette valve.

8.3.4 Astronomie

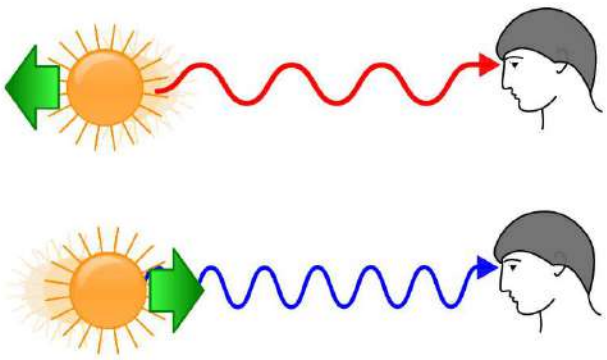
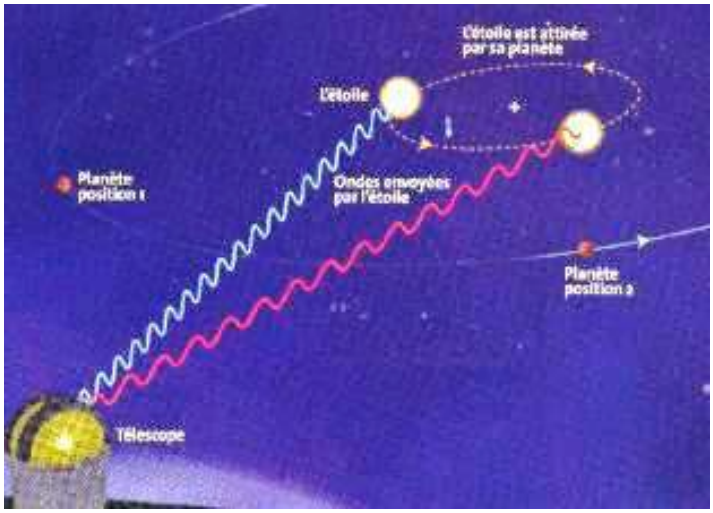


FIGURE 8.11 – (a) Un astre qui s'éloigne donnera un décalage vers le rouge. (a) Un astre qui se rapproche donnera un décalage vers le bleu.

Les corps célestes émettent vers la Terre de la lumière qui peut être décomposée et analysée (grâce à des spectres). En fait les astronomes s'intéressent en particulier aux raies H_α de l'hydrogène car l'hydrogène est particulièrement abondant dans l'univers et ces raies sont caractéristiques et faciles à reconnaître. [1] En l'analysant et en la comparant

1. En physique et en astronomie, H_α, est une raie d'émission particulière de l'atome d'hydrogène située dans le spectre visible à 656,3 nanomètres. Elle correspond à une transition entre les niveaux d'énergie

avec des spectres connus, on s'est aperçu que les raies de couleurs émises par les galaxies sont décalées vers le rouge. L'effet Doppler permet de comprendre ce phénomène. (Voir figure **??**).



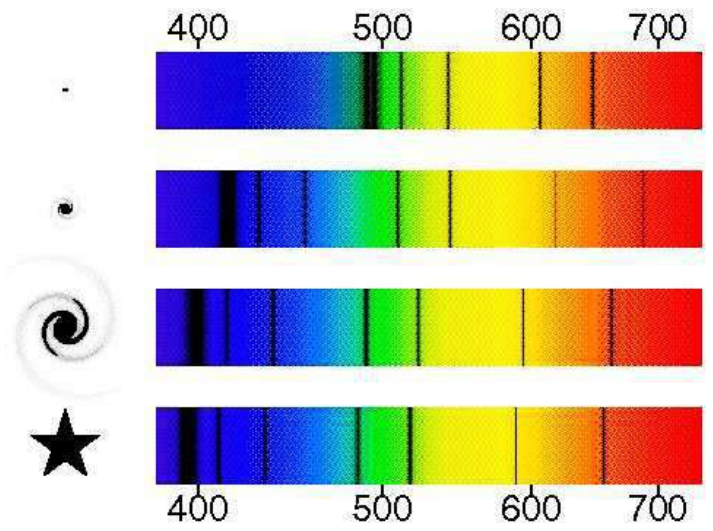


FIGURE 8.12 – (a) Détection d'une exoplanète : considérons une étoile autour de laquelle tourne une planète relativement massive. En vertu de la loi de la gravitation universelle, l'étoile sera animée d'un mouvement de rotation elliptique autour d'un point fixe. A certains moments, l'étoile se "dirigera" vers la Terre et à d'autres moments elle s'en "éloignera". Ces deux situations correspondent à des différences dans le spectre de l'étoile. Le décalage des raies sera une fois vers le bleu et une fois vers le rouge. L'analyse de ces spectres permet donc de détecter l'existence d'une exoplanète. (b) De haut en bas : le spectre d'une étoile proche, celui d'une galaxie proche, celui d'une galaxie lointaine et celui d'un objet très lointain, appelé quasar. On remarque que les raies H_α se décalent de plus en plus vers le rouge. c'est grâce à ce genre de mesure que Hubble a pu démontré l'expansion de l'univers.

Si l'étoile s'éloigne de nous, les fréquences des ondes lumineuses émises par celle-ci sont plus petites et on observe un spectre décalé vers le rouge. Si l'étoile se rapproche de nous, les fréquences sont plus grandes et le spectre se décale vers le bleu. En mesurant le décalage des raies, on peut trouver la vitesse d'éloignement des astres et confirmer la théorie de l'expansion de l'Univers. [2]

principaux $n = 3$ et $n = 2$. Nous parlerons des niveaux de transition dans la partie du cours consacré à la physique moderne.

2. Une « source de rayonnement quasi-stellaire » (quasar), (quasi-stellar radio source en anglais) est une galaxie lointaine et très énergétique avec un noyau galactique actif. Ce sont les objets les plus lumineux de l'univers. Bien qu'il y ait d'abord eu une certaine controverse sur la nature de ces objets jusqu'au début des années 1980, il existe maintenant un consensus scientifique selon lequel un quasar est la région compacte

8.3.5 Météorologie

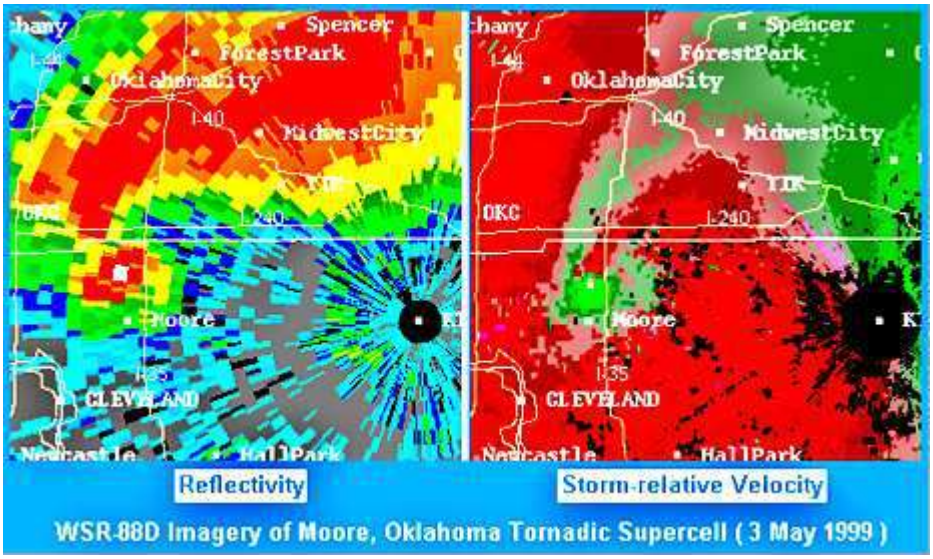


FIGURE 8.13 – Suivit d'une tornade de type 5 par Radar Doppler. Etude des quantités et des mouvements des précipitations.

Le radar météorologique Doppler présente non seulement toutes les caractéristiques du radar météorologique normal, c'est-à-dire qu'il permet d'évaluer l'intensité des perturbations et la distance à laquelle elles se trouvent, mais en plus de cela, les radars météorologiques Doppler peuvent aussi mesurer leur vitesse et l'orientation de leur mouvement. (Voir figure 8.13). Pour cela, il émet dans l'atmosphère des pulsations d'ondes radiophoniques, qui rebondissent sur la glace, la neige, les gouttelettes d'eau ou d'autres particules atmosphériques. Les caractéristiques physiques de ces ondes (c'est-à-dire leur longueur d'onde) sont consignées à l'émission. Lorsqu'elles rencontrent une perturbation, elles sont réfléchies par les particules qui la composent (neige, gouttelettes d'eau, etc) sous forme d'échos, puis sont alors réceptionnées par le radar qui analyse à nouveau leurs caractéristiques physiques. Ainsi, si la longueur d'onde se réduit, on en déduit selon les principes de l'effet Doppler que la perturbation s'approche du radar, et à l'inverse, si elle augmente, que la perturbation s'en éloigne. Comme la vitesse de déplacement des ondes (qui est la vitesse de la lumière) et l'orientation de l'antenne radar sont connues, l'éloignement, la position et la vitesse (radiale) de la perturbation par rapport à l'émetteur radar peuvent être calculés, à partir des échos. Cette information sert à préciser le lieu et l'intensité de la perturbation (pour l'intensité, voir ci-dessus) dans la région couverte par le radar (un cercle de 200 à 400 km de rayon). Le radar météorologique Doppler fournit donc des informations beaucoup plus précises que le radar météorologique normal au sujet des perturbations atmosphériques et de leur évolution.

entourant un trou noir supermassif au centre d'une galaxie massive. Leur taille est de 10 à 10 000 fois le rayon de Schwarzschild du trou noir. Leur source d'énergie provient du disque d'accrétion entourant le trou noir.

8.4 Lecture : Le mur du son

Le mur du son est un phénomène physique aérodynamique caractérisé par l'atteinte d'une vitesse au moins égale à celle de la vitesse du son, soit 1 224 km/h (dans l'air à 15°C) ou Mach 1, et provoquant une onde de choc sous forme de « bang » supersonique[3]. (Voir figure 8.14).

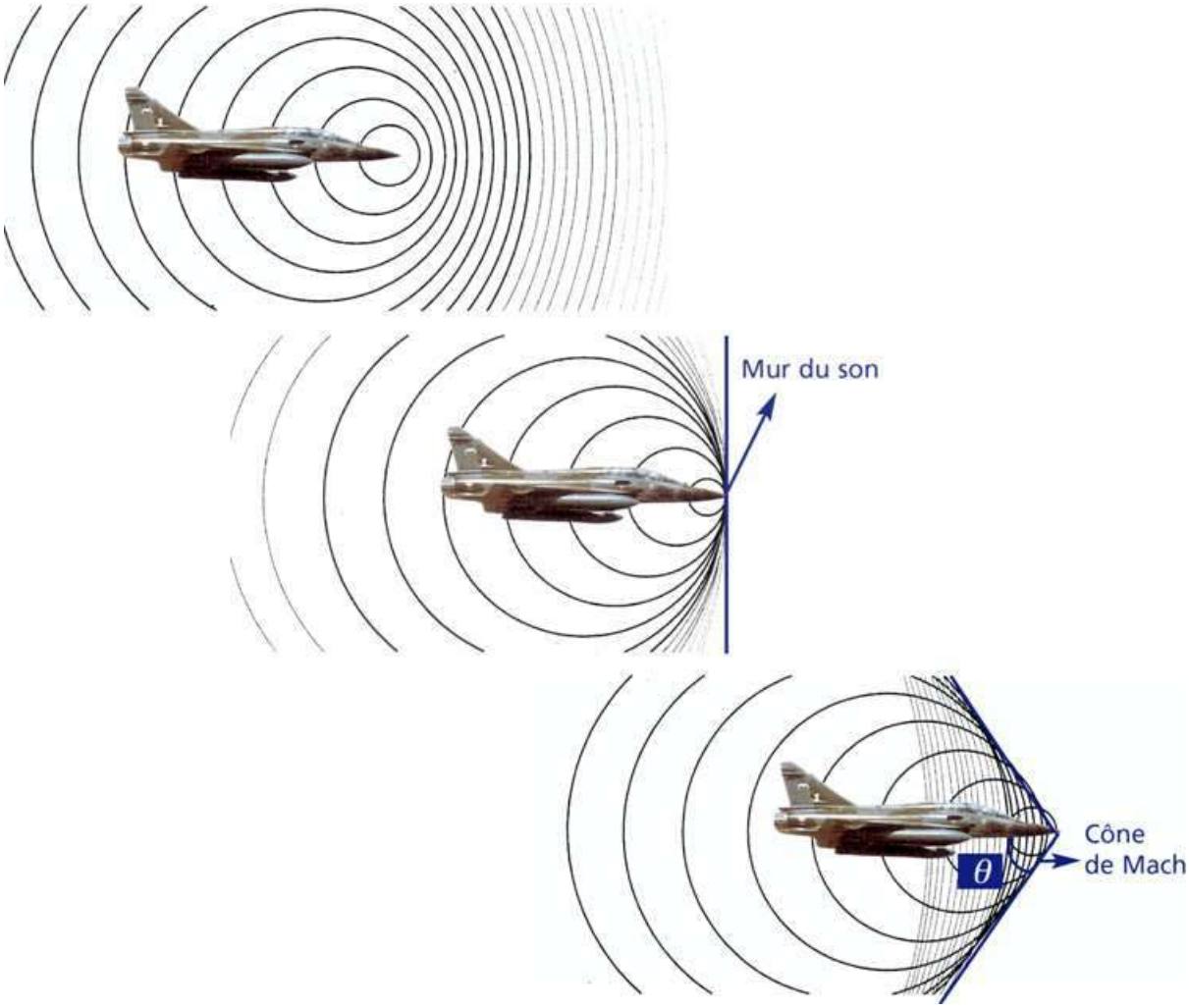


FIGURE 8.14 – Lorsque la vitesse de l'avion augmente, les ondes se concentrent devant lui. Quand il atteint la vitesse du son (Mach 1), l'ensemble des ondes sont réunies et forme un "mur". Au delà de Mach 1, un cône de pression se forme. (a) vol subsonique ($V_{avion} < V_{son}$) ; (b) vol transonique ($V_{avion} = V_{son}$) ; (c) vol supersonique ($V_{avion} > V_{son}$).

Quand un avion vole, il comprime l'air devant lui et crée une dépression derrière lui vu

3. On distingue : (a) *l'explosion* qui est une réaction chimique d'oxydation ou de décomposition d'une substance ou d'un mélange de substances pyrotechniques s'accompagnant d'un important dégagement d'énergie en un temps très court ; (b) *la déflagration* qui est une explosion chimique dans laquelle la zone de réaction chimique se propage à vitesse subsonique dans le milieu initial principalement par conductibilité thermique ; (c) *la détonation* qui est une explosion chimique dans laquelle la zone de réaction chimique se propage à une vitesse supersonique dans le milieu initial par l'intermédiaire d'une onde de choc.

que l'air ne remplit pas instantanément l'espace laissé vacant par l'avion. En chaque point de sa trajectoire, il émet ainsi une **onde de compression-dépression** qui se propage à la vitesse du son dans toutes les directions à partir du point d'émission. Le front d'onde est une sphère dans toutes les directions à partir du point d'émission. Le front d'onde est une sphère centrée sur la position de l'avion quand il a émis cette onde et dont le rayon augmente avec le temps. La détonation est donc la "trace" au sol des ondes de compression-dépression engendrées par le déplacement supersonique de l'avion.. Quand la frontière (une sphère) atteint un point de la terre, un observateur qui s'y trouve entend le bruit de l'avion comme si celui-ci était encore à l'endroit où le son a été émis, alors que l'avion n'y est plus. Lorsque l'avion vol à une vitesse supérieure à la vitesse du son, il se déplace plus vite que le front d'onde et le dépasse. Mais comme il continue d'émettre des ondes lors de son déplacement, les fronts d'onde se chevauchent et les sphères sont finalement toutes logées dans une cône (appelé cône de Mach) dont le sommet est la position de l'avion. C'est le sillage supersonique de l'avion. Dans ces conditions, la pression s'accumule très fortement à l'avant de l'avion. Lorsque le cône qui avance avec l'avion "balaie" la position de l'observateur, celui-ci entend alors le bruit de l'avion comme un bang ultra sonore soudain et retentissant. Et c'est le choc d'air comprimé sur nos tympans qui produit la détonation. L'angle d'ouverture du cône de Mach est donné par :

$$V_{son} = V_{avion} . \sin \theta$$

Le bang supersonique n'est pas seulement produit lorsque l'avion franchit le mur du son mais il l'est contamment tout au long de la phase de vol supersonique. Mais l'observateur ne l'entend qu'un seule fois, c'est-à-dire au moment où il est traversé par le cône de Mach.

FIGURE 8.15 – (a) Avion passant le mur du son. On notera les condensations locales. La dépression de l'air à l'intérieur du cône de Mach condense la vapeur d'eau, ce qui permet de le visualiser. En effet, la position du nuage de vapeur d'eau correspond au cône de Mach. (b) Le 25 septembre 1997, dans le désert du Nevada aux États-Unis, Thrust SSC atteint 1 149,30 km/h. Lors d'une seconde tentative, le 15 octobre 1997, soit très exactement 50 ans et un jour après que le mur du son ait été franchi pour la première fois, un record est établi au même endroit à 1 227,986 km/h[6] (1 227,985 km/h selon la FIA), soit plus de 340 mètres par seconde. Thrust SSC devient ainsi le premier véhicule roulant au sol à atteindre officiellement le mur du son, la vitesse du record représentant une pointe à Mach 1,01 dans les conditions physiques du moment

8.5 Exercices

Dans les exercices suivants, on prendra la vitesse du son égale à 340 m/s, sauf indication particulière.

1. Une voiture de police s'apprête à poursuivre, sirène allumée, des malfaiteurs. Tu l'entends sans la voir, et lorsqu'elle démarre, le son devient plus grave. Que peux-tu en déduire ? Justifie ta réponse, trace un schéma, et précise sur quelle propriété tu t'appuis.

2. La fréquence d'une sirène est 600 Hz (perception au repos). Si un observateur perçoit ces ondes comme ayant une fréquence de 580 Hz, y-a-t-il rapprochement ou éloignement entre lui et la sirène ?

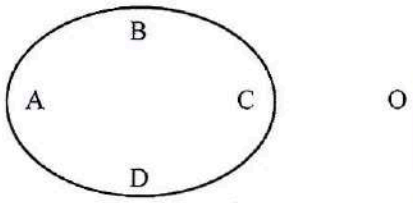
Position de la moto	Intensité du son	Fréquence du son	
A B C D			

FIGURE 8.16 –

3. Une moto parcourt le circuit dans le sens ABCD (Voir figure 8.16). Décrire les variations d'intensité et de fréquence sonore perçues par l'observateur O. Lors du passage de la moto par les positions A,B,C et D, comparer la fréquence perçue par O à celle perçue lorsque la moto est immobile.

4. Un enfant oscille sur une balançoire à une proximité d'une source sonore de fréquence fixée. Il passe successivement par les positions A,B,C et D (Voir figure 8.17). Comment varie l'intensité et la hauteur du son perçues par l'enfant.

Passages	Intensité sonore	Hauteur sonore
A		
B		
C		
D		

FIGURE 8.18

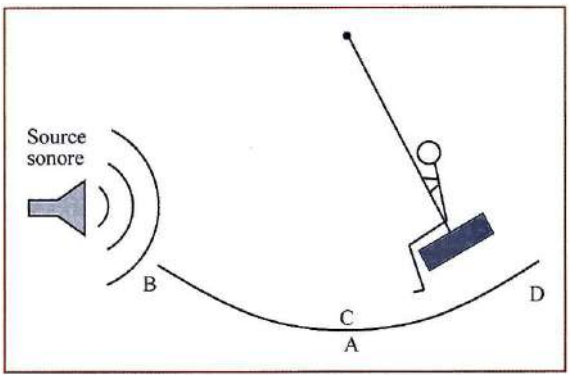


FIGURE 8.17 –

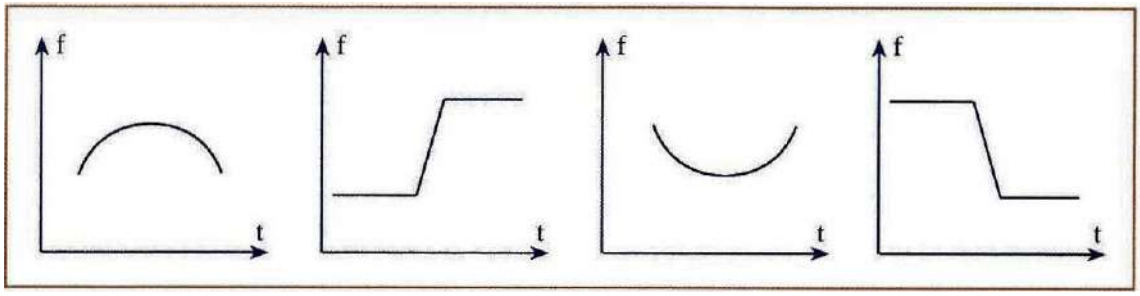


FIGURE 8.19 –

5. Un homme au bord d'une grand-route écoute le son provenant d'une voiture qui s'approche, passe à côté de lui. Quel graphique (figure 8.19) représente le mieux la fréquence perçue par l'homme en fonction du temps ?

6. Debout sur le trottoir, vous percevez une fréquence de 510 Hz provenant de la sirène d'un voiture de police qui se rapproche. Après le passage de la voiture, vous percevez le son de la sirène à une fréquence de 430 Hz. Déterminez la vitesse de la voiture de police après ces observations.
(Rép : $v = 104$ km/h)

7. Un sifflet de train est actionné par le conducteur, qui l'entend à 650 Hz. Si le train se dirige vers la gare à la vitesse de 20 m/s, quelle est la fréquence perçue par un voyageur qui attend sur le quai ?

8. Un aviateur s'approche d'une source sonore de fréquence 1044 Hz. Il perçoit une fréquence de 1305 Hz. Quelle est la vitesse de l'avion ?
(Rép : 85 m/s)

9. Calculer en % la variation de fréquence du son émis par le siflet d'une locomotive. (a) lorsque celle-ci s'approche d'un observateur à la vitesse de 108 km/h ; (b) lorsqu'elle s'éloigne de l'observateur à la même vitesse.

(Rép : (a) 9.7% ; (b) -8.1%)

10. Une source sonore ponctuelle montée sur une voiture de police émet un signal de 1000 Hz. (a) Si la voiture roule à 30 m/s dans une rue rectiligne, que sera la longueur d'onde perçue par des gens placés devant et derrière cette voiture ? (b) Quelle est la longueur d'onde mesurée dans la voiture ? Prendre la vitesse du son à 335 m/s.

11. Une onde sonore de fréquence 1000 Hz est émise par une source immobile vers une cible qui s'approche à 20 m/s. Quelle est la fréquence du signal réfléchi ?

12. Une voiture S roulant à la vitesse de 117 km/h se prépare à dépasser une file de véhicules et notamment la voiture R roulant à la vitesse de 63 km/h. Le chauffeur de S actionne son avertisseur et produit de ce fait un son de fréquence 300 Hz. Quelle est la fréquence de son perçu par le conducteur de R (a) avant le dépassement ; (b) après le dépassement ?
(Rép : (a) 314 Hz ; (b) 288 Hz)

13. Une voiture de police roule à 50 m/s dans le même sens qu'un camion qui roule à 25 m/s. La sirène de la voiture de police a une fréquence de 1200 Hz. Quelle est la fréquence entendue par le chauffeur du camion lorsque la voiture de police se trouve (a) derrière la camion ; (b) devant le camion ?
(Rép : (a) 1303 Hz ; (b) 1123 Hz)

14. Reprendre les conditions de l'exercice précédent, mais supposons maintenant que l'automobile et le camion se dirige l'un vers l'autre. Quelle est la fréquence entendue par le chauffeur du camion (a) lorsque l'automobile se rapproche ; (b) une fois qu'elle a dépassé le camion ?
(Rép : (a) 1510 Hz ; (b) 969 Hz)

15. Une chauve-souris se dirige vers un obstacle à une vitesse de 8m/s. Elle émet des cris d'une fréquence de 50 kHz, à raison de 40 cris par seconde.
    - Quelle est la fréquence de l'écho ?
    - Quelle est la fréquence entendue par la chauve-souris ?
    - Combien de cris reçoit-elle en retour chaque seconde ?

16. A quelle vitesse une source sonore devrait-elle s'approcher d'un observateur pour que celui-ci entende un son dont la fréquence est égal 4/3 du son émis par la source ?
(Rép : 85 m/s)

17. Un sifflet donne un son d'une fréquence de 800 Hz. La vitesse du son dans l'air est de 322 m/s.
    - Quelle fréquence perçoit-il lorsqu'il s'approche de la source sonore à la vitesse de 90 km/h ?
    - Quelle fréquence perçoit-il lorsque étant au repos, la source s'approche à la 90 km/h ?

– Quelle fréquence perçoit-il lorsque étant au repos, la source sonore s'éloigne à la vitesse de 90 km/h ?

(Rép : 946 Hz ; 952 Hz ; 818 Hz)

18. Dans un grand laboratoire, pour mesurer la vitesse d'un objet, on utilise un dispositif analogue à celui du radar de la police. Cependant, on utilise un autre type d'ondes. On envoie vers cet objet des ultrasons de fréquence 80 000 Hz. On parle alors de sonar puisqu'il s'agit d'ondes sonores. Les ultrasons sont réfléchis vers la source par l'objet en mouvement. Si l'objet s'approche du sonar à la vitesse de 12 m/s.
– Quelle est la valeur de la fréquence des ultrasons réfléchis par l'objet ?
– Quelle est alors la fréquence perçue par le récepteur du sonar ?
– Existe-t-il une limite à la taille des objets détectables par cette méthode ?

(Rép : 82824 Hz ; 85854 Hz. Si la taille est trop petite par rapport à la longueur d'onde $\lambda = 4.25$ mm, il y aura une trop forte diffraction de l'onde su sonar et une faible réflexion ce qui empêche une détection efficace.)

$(x^3-H^2)^3$
H_2O
$\sqrt{25}x$
$\sqrt{3}$
$\overline{ab}$
π

Deuxième partie

Les ondes électromagnétiques

Chapitre 9

La propagation de la lumière

9.1 La dispersion de la lumière par un prisme

Nous avons déjà tous remarqué que lorsqu'on regarde de la lumière à travers un morceau de verre, il apparaît différentes couleurs. (Voir figure 9.1)

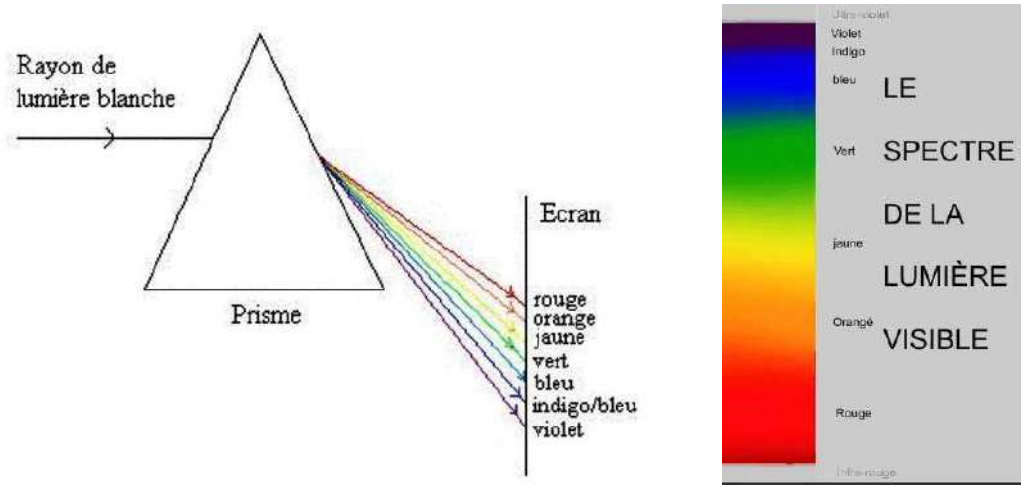


FIGURE 9.1 – (a) La lumière blanche est une lumière composée. Elle est décomposée par un prisme. On obtient alors des lumières monochromatiques. (b) Les couleurs de l'arc-en-ciel sont traditionnellement divisé en sept couleurs. Cependant, ceci est une convention qui est loin d'être respectée par tous car en réalité la lumière blanche est constituée d'une infinité de couleurs différentes.

Envoyons de la lumière issue d'une lampe normale sur un prisme qui est un milieu homogène et transparent limité par deux faces planes non parallèles. Cette lumière qui nous semble blanche est appelée **lumière blanche**.

Derrière le prisme, nous obtenons un étalement de couleurs différentes appelé **spectre**. Le spectre est composé des couleurs de l'arc-en-ciel. On y distingue les couleurs suivantes : rouge , orange , jaune , vert , bleu , indigo , violet. [1]

1. L'arc-en-ciel contient une infinité de couleurs. Le spectre lumineux, dont la décomposition est entraînée par la réfraction, est en effet continu, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frontière réelle entre les couleurs. En effet, comme pour tout dégradé, les couleurs différentes voisines sur le dégradé ne peuvent

L'expérience met en évidence que la lumière blanche est composée de rayons de différentes couleurs. Le prisme permet de les séparer car en fait le rouge ne se réfracte pas aussi fort que le violet. On appelle cela **la dispersion de la lumière par un prisme**.

La lumière d'une seule couleur est dite : **lumière monochromatique**. Autrement dit, la lumière blanche est un mélange des différentes couleurs. Elle est dite : **lumière polychromatique**

Chaque couleur est caractérisée par une longueur d'onde et une fréquence. Le spectre visible s'étale de 400 nm ($= 0,4 \times 10^{-6}$ m) pour le violet à 800 nm ($= 0,8 \times 10^{-6}$ m) pour le rouge.

9.2 Identification d'une source lumineuse

9.2.1 Le spectroscope

Le spectroscope (Voir figure 9.2) est un appareil qui permet d'analyser la lumière d'une source. Il est constitué d'un prisme dont le but est de décomposer la lumière de la source à étudier en ses différents rayons.

9.2.2 Spectre

Si on regarde le spectre de raies produit par la lumière émise par une lampe à vapeur de sodium ou une lampe à vapeur de mercure, on obtient des spectres différents. En fait le spectre dépendra du métal contenu dans la vapeur de l'ampoule.

On obtient ainsi une véritable carte d'identité de la source lumineuse par une étude spectroscopique. Chaque source a son propre spectre et ses propres raies. (Voir figure 9.3)

être distinguées entre elles par l'oeil humain. Il ne possède par contre qu'une partie de toutes les couleurs existantes : les couleurs saturées monochromatiques. C'est ainsi que le magenta n'est pas une couleur de l'arc-en-ciel. Le spectre s'étend du violet au rouge, et le magenta serait plutôt directement entre le rouge et le violet, sur la ligne des pourpres. Si le magenta est absent de l'arc-en-ciel, c'est donc parce qu'il ne correspond à aucune radiation pure. Cette couleur ne peut être obtenue que par combinaison de radiations, alors que l'arc-en-ciel résulte précisément de l'émission de chaque radiation du spectre lumineux dans une direction différente, comme la décomposition de la lumière obtenue à travers un prisme. Souvent, pour représenter toutes les couleurs, on ajoute le magenta au spectre, et on obtient une roue chromatique. Mais il ne faut pas oublier que cet ajout est arbitraire. Cependant on choisit généralement de considérer que l'arc-en-ciel comprend quelques couleurs dominantes, en nombre fini. Ce nombre varie de 3 à 9 selon les cultures. Aristote discernait trois couleurs, Plutarque en mentionne quatre. Aujourd'hui en occident le nombre généralement retenu est sept, fixé par Isaac Newton : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet. Ce nombre sept a en partie été choisi à cause de l'analogie entre la lumière et le son, la gamme musicale comprenant sept notes par octave. Il correspond aussi approximativement au nombre de couleurs qu'un individu moyen peut discriminer dans le spectre lumineux. Le plus critiqué des choix de Newton est de faire de l'indigo une couleur principale, alors qu'il correspond à une gamme de fréquences très étroite. Souvent, dans les figurations symboliques des arcs en ciel, on préfère donc l'éliminer pour ne garder que six couleurs, qui ont l'avantage de consister en trois couleurs (rouge, bleu, jaune) pouvant générer les trois autres par synthèse soustractive. Les sept couleurs retenues par Newton gardent cependant une forte influence culturelle. Ces couleurs primaires conventionnelles ne correspondent pas du tout à celles utilisées en synthèse additive, correspondant au mécanisme physique en oeuvre dans les arcs-en-ciel. L'oeil humain possède des récepteurs, les cônes, sensibles à trois couleurs : rouge, vert et bleu. Les couleurs secondaires dans ce système sont jaune, cyan, magenta - le cyan (entre le vert et le bleu) n'est pas une couleur retenue dans le découpage de Newton et, comme on l'a vu, le magenta est absent de l'arc-en-ciel.

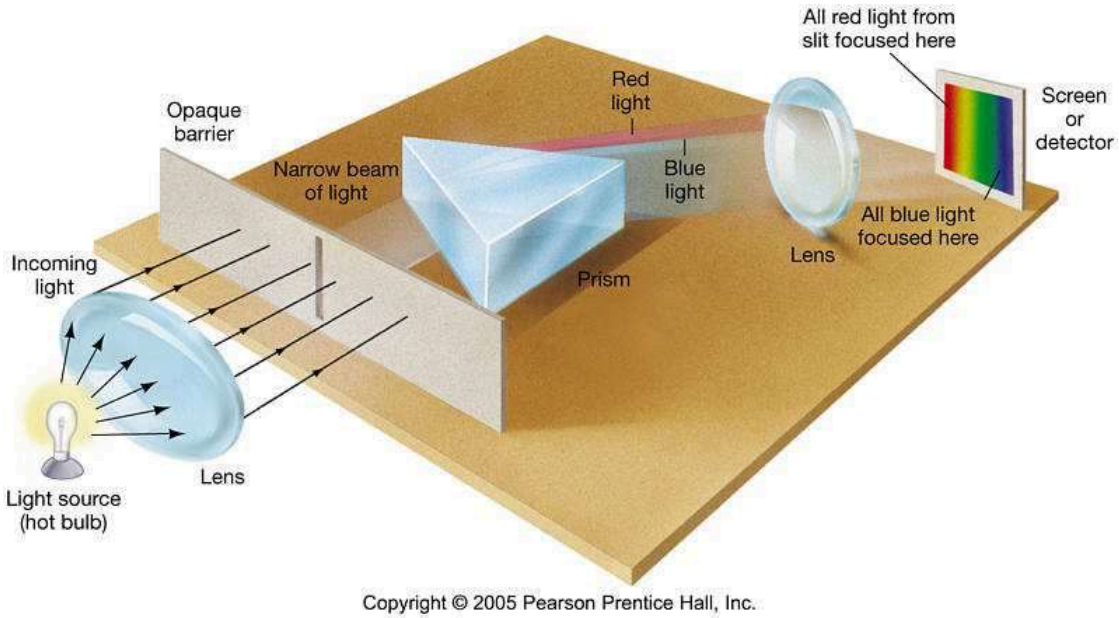


FIGURE 9.2 – Principe de fonctionnement d'un spectroscope : la lumière incidente (incoming light) issue d'une source lumineuse (light source) est focalisée par une lentille (lens). Une fente placée dans un obstacle opaque (opaque barrier) détermine un faisceau étroit de lumière (narrow beam of light) qui est décomposé dans le prisme (prism). Une deuxième lentille concentre la lumière sur un écran (screen) ou un détecteur (detector). Le lumière rouge (red light) est moins déviée que la lumière bleue (blue light)

Les applications de la spectroscopie sont très étendues comme par exemple l'analyse chimique, l'astronomie, etc. La spectroscopie a permis des avancées spectaculaires dans la compréhension de la structure interne des atomes car les phénomènes d'émission et d'absorption sont directement liés à la structure électronique des atomes.

9.3 Comportements connus de la lumière

Faisons l'inventaire de nos connaissances actuelles sur la lumière.

1. La lumière transporte de l'énergie.
2. La lumière se propage en ligne droite.
3. La lumière peut se réfléchir sur certaines surfaces. L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. (Voir figure 9.5).
4. les surfaces mattes diffusent la lumière, c'est-à-dire la renvoient dans toutes les directions. (Voir figure 9.4).
5. La lumière se réfracte en passant d'un milieu transparent à un autre. Les angles d'incidence $\widehat{\theta_1}$ et de réfraction $\widehat{\theta_2}$ sont liés par la loi de Snell-Descartes : $n_1 \sin\widehat{\theta_1} = n_2 \sin\widehat{\theta_2}$ où n_1 et n_2 sont les indices de réfraction des milieux respectifs. (Voir figure 9.5).
6. Et enfin la lumière blanche se décompose en passant à travers un prisme.

La question est maintenant de savoir si on peut construire un modèle qui permet d'expliquer toutes ces caractéristiques.

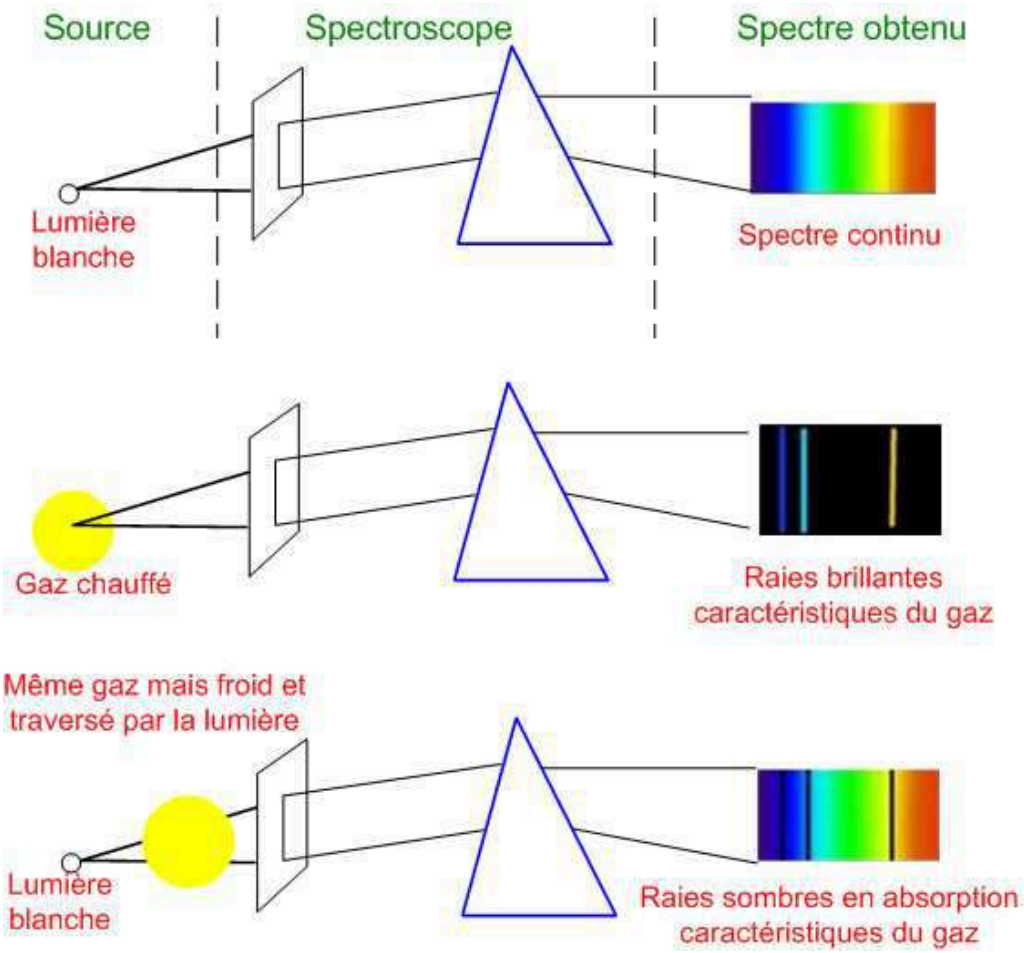


FIGURE 9.3 – Il y a principalement deux types de raies. (a) une lumière blanche détermine un spectre continu, (b) un gaz chauffé émet des longueurs d'ondes bien déterminées et caractéristiques de la composition du gaz. On parle alors d'un **spectre de raies**, (c) Si de la lumière blanche traverse un gaz, celui-ci va absorber certaines longueurs d'ondes. Le spectre obtenu montrera des raies sombres. On parle de *spectre d'absorption*

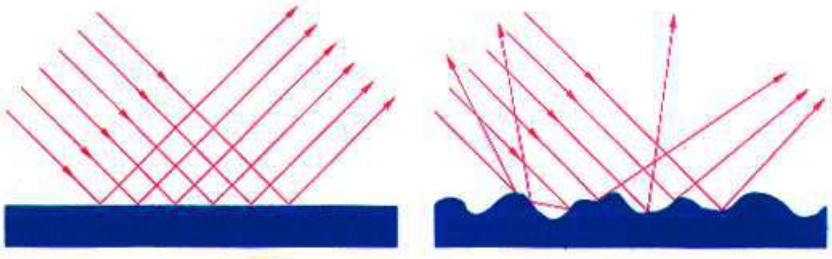


FIGURE 9.4 – (a) Si la lumière rencontre une surface lisse et réfléchissante, les rayons réfléchis auront tous la même direction. (b) Lorsque la rugosité de la surface est grande, les rayons sont réfléchis dans toutes les directions, c'est le phénomène de diffusion.

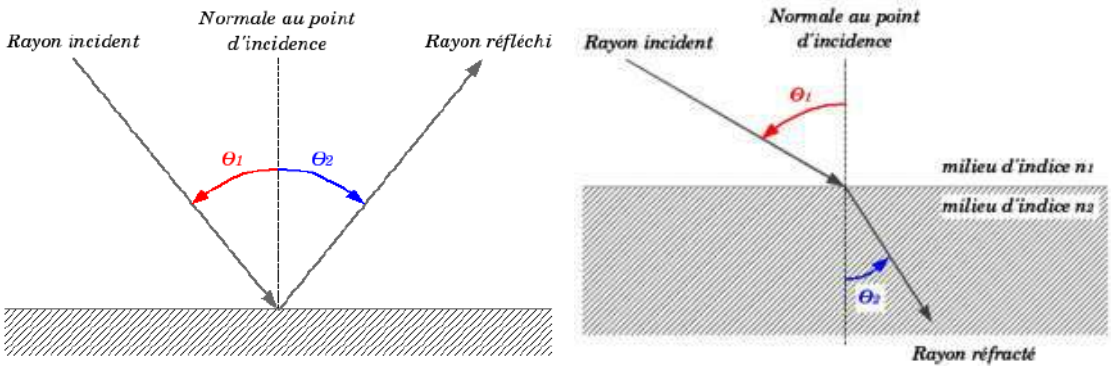


FIGURE 9.5 – a) Réflexion : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. (b) Réfraction : l'angle d'incidence et de réfraction sont reliés par la loi de Snell-Descartes

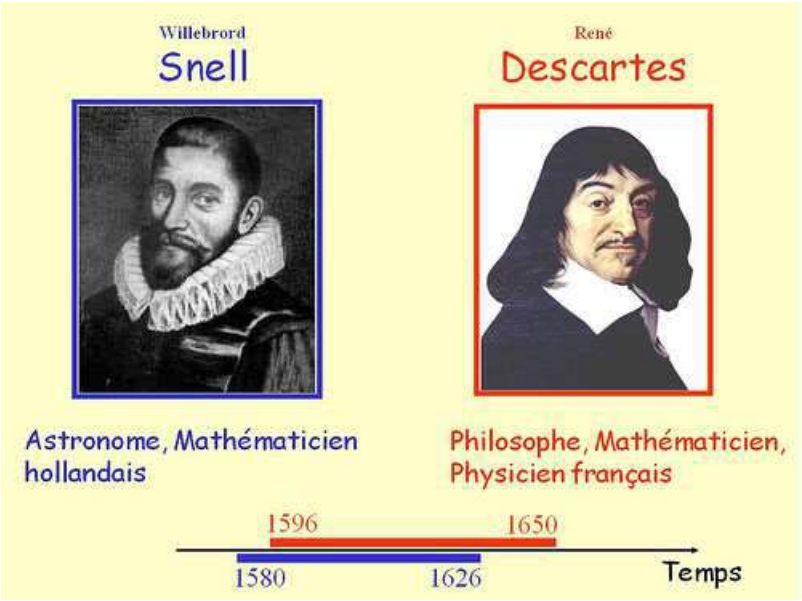


FIGURE 9.6 – (a) Willebrord Snell van Royen ou Snellius, né le 13 juin 1580 à Leyde, mort le 30 octobre 1626, est un humaniste, mathématicien et physicien néerlandais. (b) René Descartes, né le 31 mars 1596 à La Haye en Touraine (localité rebaptisée Descartes par la suite) et mort à Stockholm dans le palais royal de Suède le 11 février 1650, est un mathématicien, physicien et philosophe français. Il est considéré comme l'un des fondateurs de la philosophie moderne : il théorise le cogito, fondant ainsi le système des sciences sur le sujet connaissant face au monde qu'il se représente. En physique, il est considéré comme le fondateur du mécanisme, et en mathématiques, de la géométrie analytique. Sa méthode philosophique et scientifique, exposée à partir de 1628 dans les Règles pour la direction de l'esprit, puis dans le Discours de la méthode en 1637, affirme constamment une rupture par rapport à la scolastique enseignée dans l'Université.

9.4 Lecture : les arcs-en-ciel

Un arc-en-ciel est un phénomène optique et météorologique qui rend visible le spectre continu de la lumière du ciel quand le soleil brille pendant la pluie. C'est un arc coloré avec le rouge à l'extérieur et le violet à l'intérieur. Bien qu'un arc-en-ciel couvre un spectre de couleurs continu, il est courant de distinguer plusieurs couleurs significatives afin de pouvoir mémoriser l'ordre de celles-ci. Isaac Newton découpa arbitrairement l'arc-en-ciel en sept couleurs : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet.

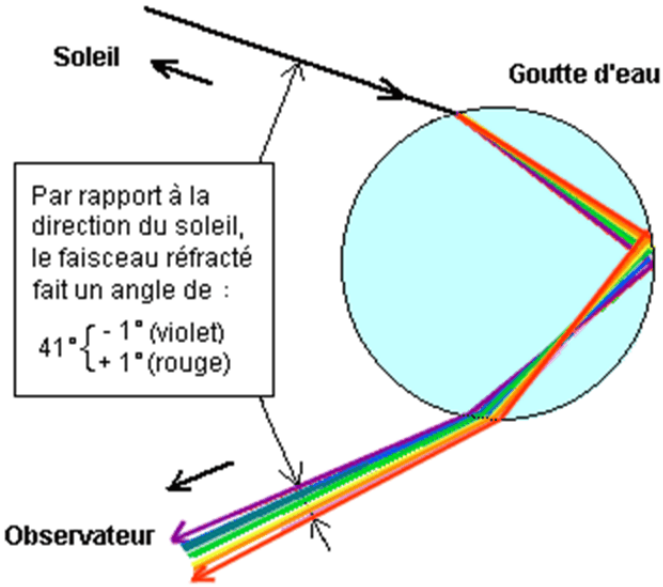


FIGURE 9.7 – Formation d'un arc-en-ciel : décomposition d'un rayon lumineux dans une goutte.

Quand un rayon de soleil pénètre dans une goutte d'eau, il est réfracté et réfléchi avant de subir une seconde réfraction en sortant de la goutte. La direction du "faisceau" réfracté dépend de la position et de l'angle du rayon incident par rapport à la surface de la goutte (considérée comme sphérique).A chaque réfraction, les "dioptres" air/eau et eau/air traversés se comportent comme un prisme : le rayon de soleil est décomposé en un spectre coloré. L'analyse du trajet optique montre que l'angle entre le rayon entrant et le faisceau sortant est d'environ $41° \pm 1°$, indépendamment de la taille de la goutte. (Voir figure 9.7). La valeur précise de l'angle de réfraction dépend de la longueur d'onde (la couleur) des composantes de la lumière. Dans le cas de l'entrée dans un milieu plus réfringent, l'angle de réfraction de la lumière bleue est inférieur à celui de la lumière rouge (Ce phénomène est mis en évidence dans les prismes). On comprend dès lors que l'ensemble des gouttes éclairées par le soleil et telles que l'angle **S**oleil-**G**outte-**O**eil soit égal à $41° \pm 1°$, apparaissent colorées à l'observateur. Sur la figure 9.8, on a représenté les faisceaux réfractés par 4 gouttes : les gouttes du haut et du bas ne renvoient rien dans l'oeil de l'observateur. Par contre, la goutte a renvoie un rayon rouge et la goutte b renvoie un rayon violet. Suivant leurs positions, les gouttes entre a et b renvoient les couleurs intermédiaires de l'arc-en-ciel. Le résultat net est que l'on verra la couleur violette à l'intérieur de l'arc et la couleur rouge à l'extérieur. Les conditions de soleil et de pluie

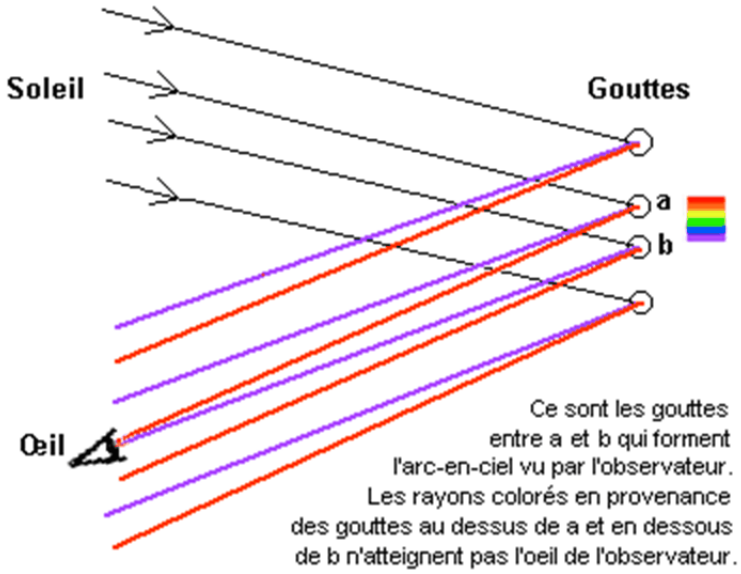


FIGURE 9.8 – Les gouttes les plus hautes envoient des rayons rouges et les gouttes les plus basses des rayons violets.

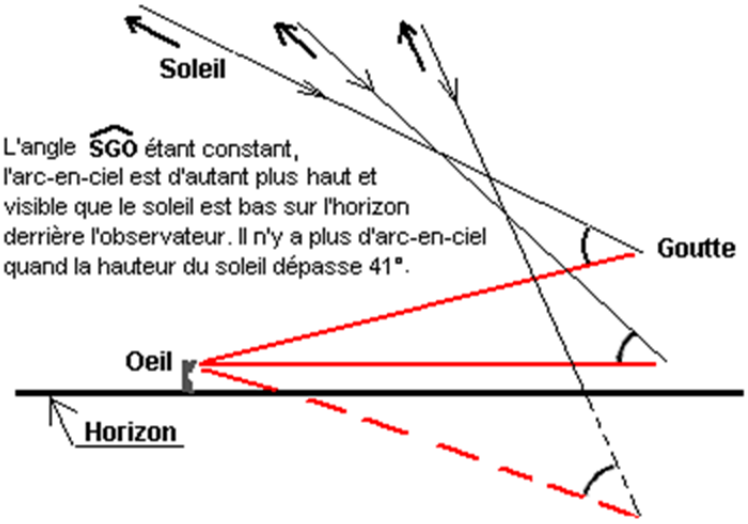


FIGURE 9.9 – L'arc-en-ciel n'apparaît que pour des positions bien déterminées du soleil.

étant réunies, c'est l'angle $\widehat{SGO}$ de 41° qui est responsable de la plus ou moins bonne visibilité de l'arc : plus le soleil est bas sur l'horizon, plus l'arc monte dans le ciel et inversement.Quand le soleil dépasse 41° au dessus de l'horizon, il ne peut plus se former d'arc-en-ciel. Aux latitudes moyennes, les arcs-en-ciel ne sont donc visibles que le soir et le matin. Cependant, au sommet d'une (haute) montagne, l'horizon proche est bien plus bas que l'oeil de l'observateur. Dans ce cas, même avec un soleil dépassant 41° de hauteur, on peut voir un arc-en-ciel se former dans la vallée.

Un arc-en-ciel n'a donc pas réellement d'existence physique mais est une illusion d'op-

tique dont la position apparente dépend de la position de l'observateur et de celle du Soleil, le centre de l'arc-en-ciel étant la direction exactement opposée à celle du Soleil par rapport à l'observateur. Toutes les gouttes de pluie réfractent et reflètent la lumière du soleil de la même manière, mais seulement la lumière d'une petite partie des gouttes de pluie atteint l'oeil de l'observateur. C'est l'image formée par la lumière de ces gouttes de pluie que nous voyons sous forme d'arc-en-ciel. Un arc-en-ciel se situe toujours à l'opposé du soleil : le soleil, l'observateur et le centre du cercle dont fait partie l'arc-en-ciel sont sur la même ligne. Appelons S le centre du Soleil, O, l'oeil de l'observateur et M, le point le plus

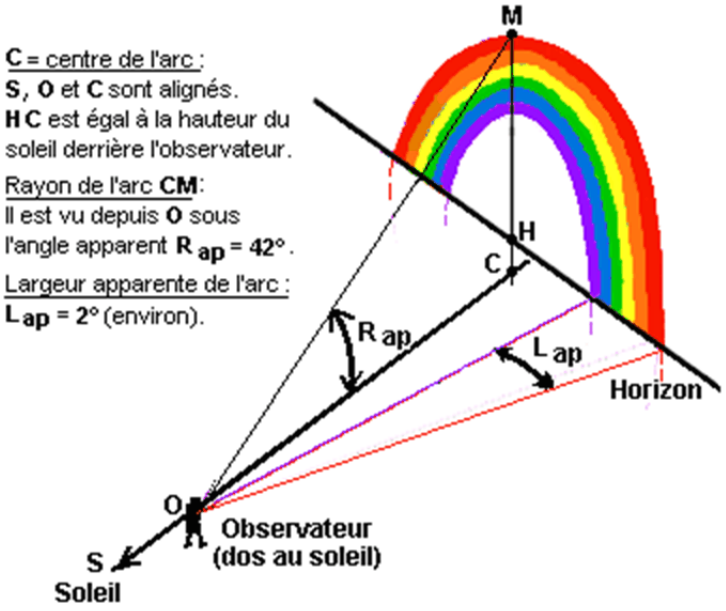


FIGURE 9.10 – Les principales caractéristiques d'un arc-en-ciel.

haut de l'arc-en-ciel. A partir des éléments précédents, on peut déduire les caractéristiques principales de l'arc :

- Le centre C de l'arc est situé sur la droite SO qui constitue l'*axe* de l'arc.
- La présence du soleil, forcément au dessus de l'horizon, impose que C soit *en dessous de l'horizon*. Par conséquent, *la partie visible de l'arc-en-ciel est toujours inférieure à un demi-cercle* (exception possible en montagne).
- Le *rayon apparent de l'arc* est de 42° (angle sous lequel apparaît le rayon CM de l'arc pour l'observateur).
- La *largeur apparente de l'arc*, du rouge au violet, est d'environ 2°. (Par comparaison, c'est 4 fois le diamètre apparent du soleil).

Dans certaines conditions favorables, il est possible de voir apparaître à l'extérieur d'un arc-en-ciel très lumineux, un second arc concentrique et beaucoup plus pâle. Cet *arc secondaire* résulte d'un trajet optique des rayons avec double réflexion à l'intérieur des gouttes d'eau. Comme on peut le constater à l'observation, cette double réflexion induit un renversement dans l'ordre des couleurs. (Voir figures 9.11).

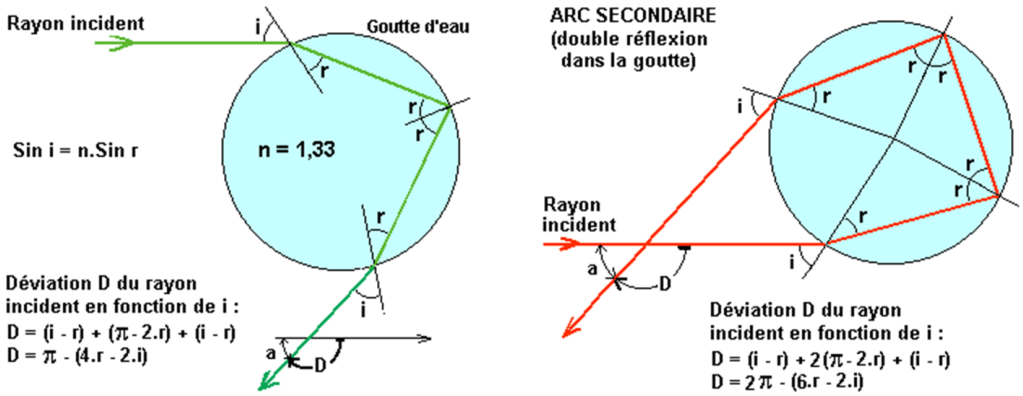


FIGURE 9.11 – (a) Trajet suivit par le rayon lumineux pour former l'arc principal. (b) Trajet suivit par le rayon lumineux pour former l'arc secondaire.

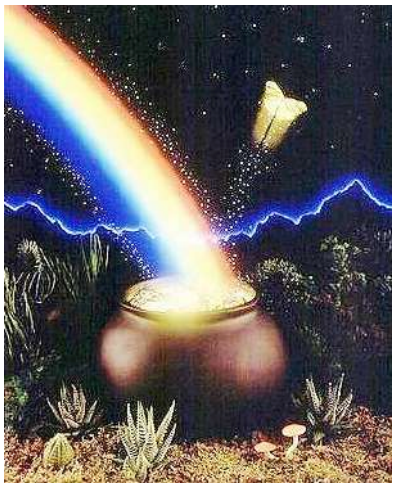


FIGURE 9.12 – On comprend dès lors pourquoi des contes de fée affirment qu'il y a un trésor au pied de l'arc-en-ciel : l'arc étant un phénomène optique dont la position dépend de celle de l'observateur, il est impossible de se voir soi-même au pied de l'arc, et donc il est impossible de contredire cette légende.

9.5 Modèle corpusculaire et modèle ondulatoire

Deux modèles vont s'affronter :

- **Modèle corpusculaire** : Dans son ouvrage fondamental "Traité d'optique" publié en 1704, Newton (Voir figure 9.13) postule que la lumière est constituée de **corpuscules** qui se propagent en ligne droite à une vitesse énorme.
- **Modèle ondulatoire** : Pourtant, en 1691, Christian Huygens (Voir page 101)dans son "Traité de la lumière" avait déjà opté pour une **conception ondulatoire**. Selon lui la lumière est constituée d'ondes.

Passons en revue quelques propriétés de la lumière et voyons que les deux modèles permettent de les expliquer

- Propriété : *La lumière transporte de l'énergie.*
  - Modèle corpusculaire : L'énergie est l'énergie cinétique des corpuscules.
  - Modèle ondulatoire : les ondes transportent de l'énergie, qu'elles communiquent de proche en proche.

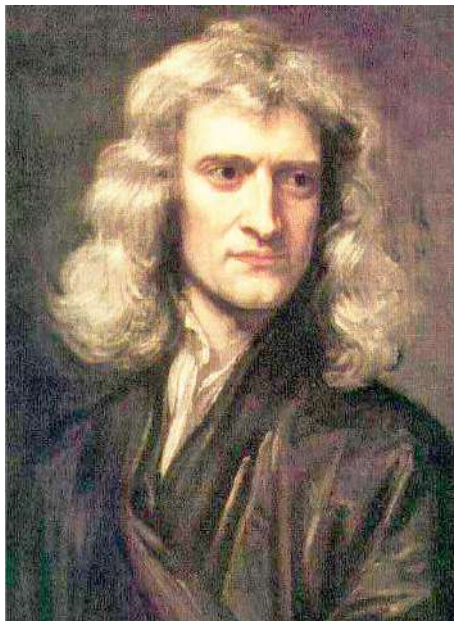


FIGURE 9.13 – Isaac Newton (4 janvier 1643 - 31 mars 1727) est un philosophe, mathématicien, physicien, alchimiste, astronome et théologien anglais. Figure emblématique des sciences, il est surtout reconnu pour sa théorie de la gravitation universelle et la création, en concurrence avec Leibniz, du calcul infinitésimal. En physique il est connu pour ces travaux en optique (décomposition de la lumière, télescope) et en mécanique. Il a établi les trois lois universelles du mouvement qui sont en fait des principes à la base de la grande théorie de Newton concernant le mouvement des corps, théorie que l'on nomme aujourd'hui Mécanique newtonienne ou encore Mécanique classique. Newton a montré que le mouvement des objets sur Terre et des corps célestes sont gouvernés par les mêmes lois naturelles. Son ouvrage Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, écrit en 1686, est considéré comme une oeuvre majeure dans l'histoire de la science. C'est dans celui-ci qu'il décrit la gravitation universelle, formule les trois lois du mouvement et jette les bases de la mécanique classique. Il a aussi effectué des recherches dans les domaines de la théologie, la philosophie et l'alchimie.

- Propriété : *La propagation de la lumière est en ligne droite.*
  - Modèle corpusculaire : Les grains de se déplacent à très grande vitesse, cela permet un déplacement rectiligne malgré la force de pesanteur. Par exemple, il est facile de calculer que la lumière s'écarterait de l'horizontale seulement de 1 mm sur une distance de 4000 km !
  - Modèle ondulatoire : La propagation des ondes est rectiligne.

- Propriété : *la lumière blanche est composée de lumières monochromatiques*
  - Modèle corpusculaire : Des différences de masses entre les corpuscules constituantes devraient expliquer ces déviations.
  - Modèle ondulatoire : La lumière blanche est composée d'ondes de fréquences différentes qui se déplacent à la même vitesse dans l'air mais plus dans le prisme.

- Propriété : *La lumière est réfléchies par certaines surfaces.*
  - Modèle corpusculaire : Une bille rebondissant contre une plaque obéit aux mêmes lois.
  - Modèle ondulatoire : Le phénomène de réflexion des ondes est facilement expliqué par application du principe de Huygens (Voir page 100).

- Propriété : *La lumière est réfractée en passant d'un milieu transparent à un autre.*
  - Modèle corpusculaire : On peut facilement retrouver la loi de Snell-Descartes, si on suppose que la vitesse de propagation de la lumière est plus grande dans le milieu transparent que dans l'air (ou le vide).
  - Modèle ondulatoire : On peut également retrouver la loi de Snelle-Descartes, de nouveau par application du principe de Huygens, mais en faisant l'hypothèse *inverse* en ce qui concerne les vitesses. La vitesse de la lumière est plus petite dans

le milieu transparent.

Jusqu'au 19ème siècle, les deux modèles permettaient d'expliquer les phénomènes liés à la lumière. Historiquement le modèle corpusculaire à prévalu car c'est Newton qui postule l'existence de corpuscules en 1704, au moment du triomphe de la mécanique ; alors qu'en 1691 Christian Huygens avait opté pour une théorie ondulatoire. Dans la première moitié du 19ème siècle de nouvelles observations sont faites qui ne sont pas explicables par le modèle corpusculaire mais qui sont cohérentes avec le modèle ondulatoire. Par exemple, les mesures effectuées vers 1850 montrent que la vitesse de la lumière est d'environ 299 705 km/s dans l'air et seulement de 221 000 km/s dans l'eau. Ceci est en contradiction avec le modèle corpusculaire.

De plus, d'autres expériences vont venir porter un coup fatal à la théorie corpusculaire.

9.6 Les interférences lumineuses

9.6.1 Expérience de Young

FIGURE 9.14 – Thomas Young (13 juin 1773-10 mai 1829), est un physicien, médecin et égyptologue britannique. Son excellence dans de nombreux domaines non reliés fait qu'il est considéré comme un polymathe, au même titre par exemple que Léonard de Vinci, Gottfried Leibniz ou Francis Bacon. Son savoir était si vaste qu'il fut connu sous le nom de phénomène Young. (A l'âge de quatorze ans, il parle l'anglais, le français, l'italien, le latin, le grec, l'hébreu, le chaldéen, le syriaque, l'araméen samaritain, l'amharique, le turc, l'arabe et le persan.) Il exerça la médecine toute sa vie, mais il est surtout connu pour sa définition du module de Young en science des matériaux et pour son expérience des fentes de Young en optique, dans laquelle il mit en évidence et interpréta le phénomène d'interférences lumineuses. Il s'intéressa également à l'égyptologie en participant à l'étude de la pierre de Rosette.

L'expérience suivante, réalisée pour la première fois vers 1800 par le physicien Thomas Young (Voir figure 9.14) décrit un des dispositifs expérimentaux permettant d'obtenir une figure d'interférence qui est un critère pour détecter le caractère ondulatoire d'un phénomène.

Une source lumineuse monochromatique, (Voir figure 9.15) obtenue à partir d'un rayon laser ou bien en disposant un filtre coloré dans le trajet du rayon lumineux arrive sur une plaque percée de deux fentes. Ces deux fentes se comportent comme deux sources secondaires en concordance de phase. On observe sur un écran placé derrière des franges alternativement sombres et claires : les ondes issues des deux fentes interfèrent entre elles. Ce sont les **franges d'interférences**. Les lignes où l'éclairement est maximal sont les lignes de tempête et celles où l'éclairement est nul sont les lignes de repos. Autrement dit, en certains endroits de l'écran on a lumière + lumière = obscurité. Ceci est totalement

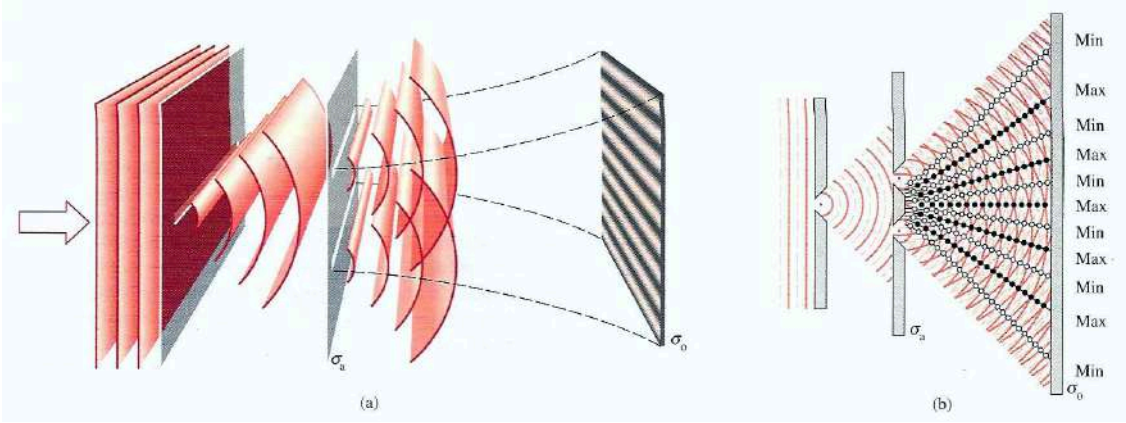


FIGURE 9.15 – On éclaire un écran opaque σ_a, muni de deux ouvertures identiques par une onde symétrique qui tombe de la même façon sur les deux ouvertures. La lumière jaillit des deux ouvertures comme si elle était émise par deux sources identiques et en phase. Les ondes lumineuses se superposent et produisent, sur l'écran σ_0, une figure d'interférence caractérisée par des franges.

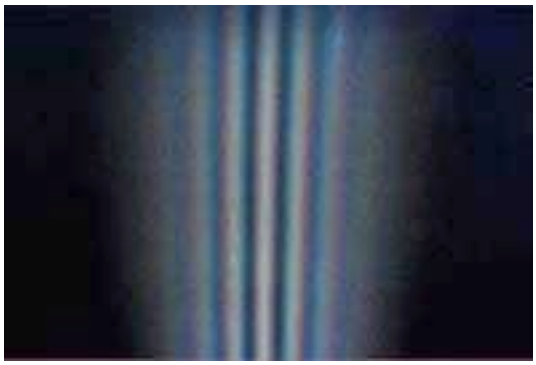


FIGURE 9.16 – Expérience de Young : franges d'interférence obtenues à partir de lumière blanche.

inexplicable par la théorie corpusculaire. Une corpuscule d'énergie + une corpuscule (identique) ne peut donner que deux corpuscules, c'est-à-dire une intensité lumineuse double et pas nulle. L'expérience de Young montre que la lumière a un caractère ondulatoire et donc que **la lumière est une onde**. Elle doit être caractérisée dès lors par une fréquence f et une longueur d'onde λ.

Effectivement, on constate que les franges d'interférence dépendent du type de lumière. Comme le montre la figure 9.18, les franges en lumière bleus sont plus rapprochées que les franges en lumière rouge. Dans le paragraphe suivant, nous établirons la loi qui permet de mesurer la longueur d'onde à partir de la distance entre deux franges dite **interfrange**.

9.6.2 Etude analytique

Soit une écran placé à une distance D des sources lumineuses S_1 et S_2. (Voir figure 9.19). Ces sources sont séparées par une distance a. Notons que $a <<< D$. D et a sont des caractéristiques fixées de l'interféromètre. Recherchons sur l'écran, les points P qui ont un éclairement maximal (les ventres). Ce point est situé à une distance x du centre de l'écran

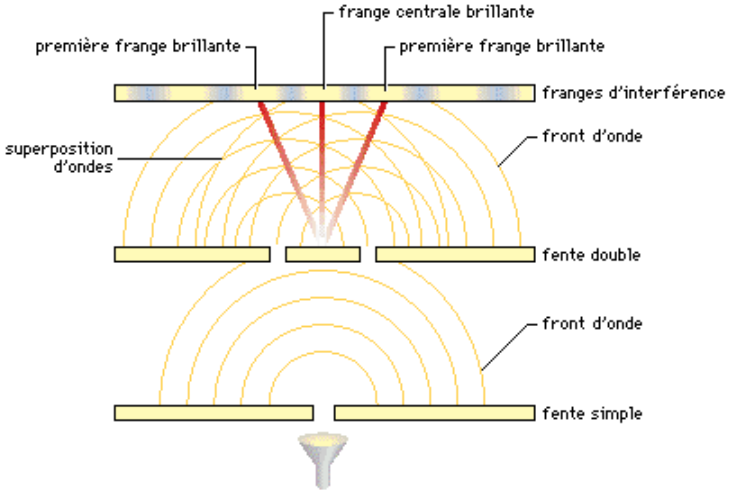


FIGURE 9.17 – Autre vue du phénomène d'interférence. La lumière émise par une lampe passe par une fente. En vertu du principe d'Huygens, cette fente joue le rôle de nouvelle source lumineuse. Les ondes émises par la fente atteignent deux autre fentes qui, à leur tour, jouent également le rôle de source synchrone (en phase). Les deux ondes vont se superposer pour produire des franges d'interférence sur l'écran. On notera que la frange centrale est la plus brillante.

et sera un point où l'éclairement est maximum s'il est situé sur une ligne où l'amplitude est maximale ou si :

$$| d_2 - d_1 | = 2k\frac{\lambda}{2} \quad (k \in \mathbb{Z}) \tag{9.1}$$

Calculons la différence de marche $d_2 - d_1$

– Dans le triangle S_2PA, par Pythagore,

$$d_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2 \tag{9.2}$$

– Dans le triangle S_1PA, par Pythagore,

$$d_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2 \tag{9.3}$$

En distribuant et en soustrayant 9.3 de 9.2, on trouve :

$$d_2^2 - d_1^2 = 2\frac{a}{x} \quad \Rightarrow \quad (d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2\frac{a}{x}$$

Comme a et x sont très petits vis-à-vis de D, d_1 et d_2 peuvent être considérés comme pratiquement parallèles et égaux à D.

$$d_2 + d_1 \approx 2D$$

Cependant cette approximation ne peut être faite sur la différence $d_2 - d_1$ car dans ce cas l'erreur relative serait de 100 %. Dès lors, on peut écrire :

$$d_2 - d_1 = \frac{ax}{D} \tag{9.4}$$

Pour que l'éclairement soit maximum en un point P de l'écran, il faut que :

$$| d_2 - d_1 | = 2k\frac{\lambda}{2} \quad (k \in \mathbb{Z})$$

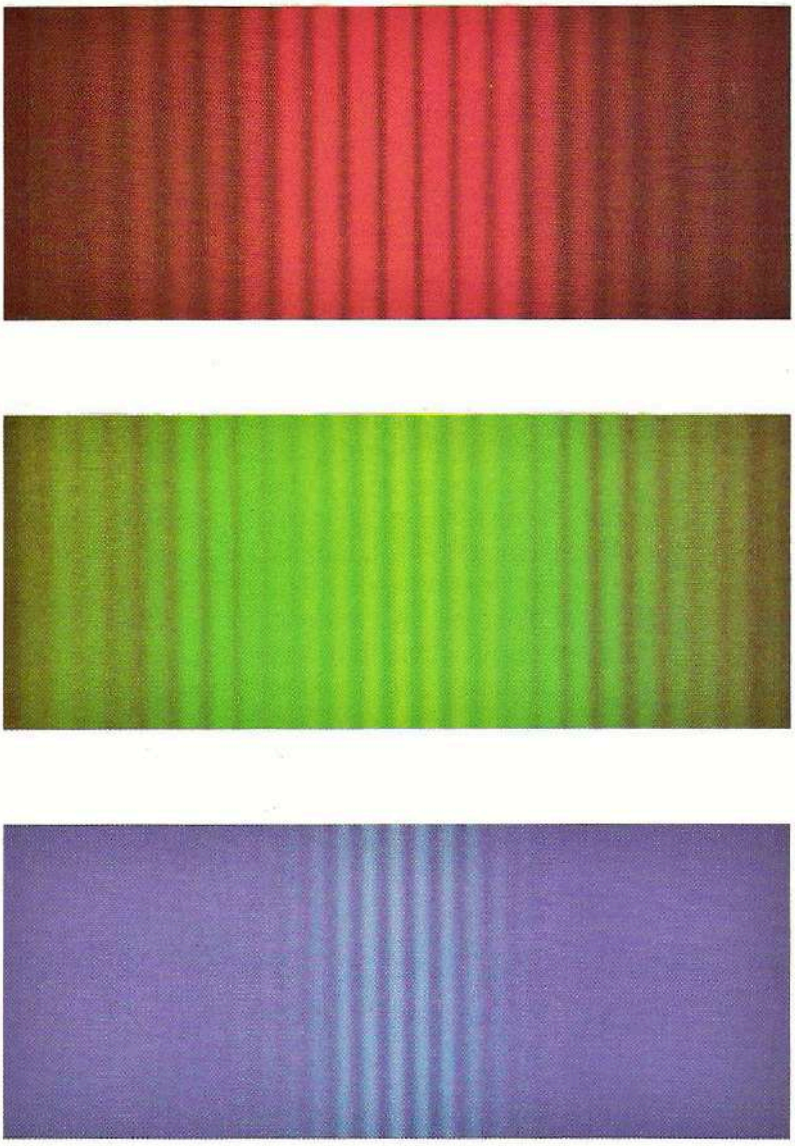


FIGURE 9.18 – Figures d'interférences obtenues à partir de lumières monochromatiques ; (a) Lumière rouge, (b) Lumière verte, (c) Lumière bleue. On notera que les interfranges sont d'autant plus petites que la longueur d'onde de la lumière est petite.

Et donc :

$$\frac{ax}{D} = 2k\frac{\lambda}{2}$$

A un k donné correspond un x que nous appellerons x_k

$$x_k = k\frac{\lambda D}{a} \tag{9.5}$$

Par exemple la position des différents maxima sera donnée par :

$$x_0 = 0 \times \frac{\lambda D}{a};\ x_1 = 1 \times \frac{\lambda D}{a};\ x_2 = 2 \times \frac{\lambda D}{a}; .....$$

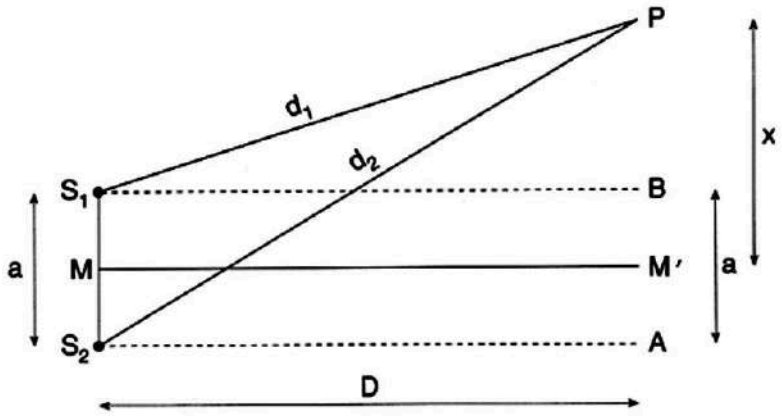


FIGURE 9.19 – Etude analytique de l'expérience de Young.

Si nous appelons interfrange la distance i telle que :

$$i = x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = x_3 - x_2 = ... = x_k - x_{k-1}$$

En conclusion :

$$i = \frac{\lambda D}{a} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{i\,a}{D}} \tag{9.6}$$

Exemple : Calcul de λ. Une expérience réalisée en lumière jaune avec les données suivantes : $a = 1$ mm et $D = 1.75$ m, donne pour résultat $i = 1$ mm. Déterminer la longueur d'onde.

Solution Il suffit d'appliquer la formule 9.6 :

$$\lambda = \frac{10^{-3} \times 10^{-3}}{1.75} = 0.57\ 10^{-6}\ \text{m}$$

La valeur de la longueur d'onde de la lumière jaune est donc extrêmement petite : de l'ordre du micromètre. C'est raison pour laquelle on exprime la longueur d'onde en *nanomètre* (nm) : 1 nm $= 10^{-9}$ m. Donc inversement : 1 m $= 10^{-9}$ m. Ainsi, $\lambda = 0.57 \times 10^{-6}$ m $= 0.57 \times 10^{-6} \times 10^{9} = 570$ nm. Nous pouvons aussi calculer la fréquence : $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.10^8}{0.57\ 10^{-6}} = 5.26\ 10^{14}$Hz.

Exemple La lumière rouge d'un laser He-Ar ($\lambda = 632.8$ nm) tombe sur un écran muni de deux fentes horizontales, très étroites et séparées de 0.200 mm. Une figure d'interférence apparaît sur un écran situé à 1.00 m.e de 0.200 mm. Une figure d'interférence apparaît sur un écran situé à 1.00 m.

1. Déterminer approximativement en radian et en mm les positions des deux premières extinctions de lumière de part et d'autre de l'axe central.
2. A quelle distance (en mm) de l'axe se trouve la cinquième frange brillante ?

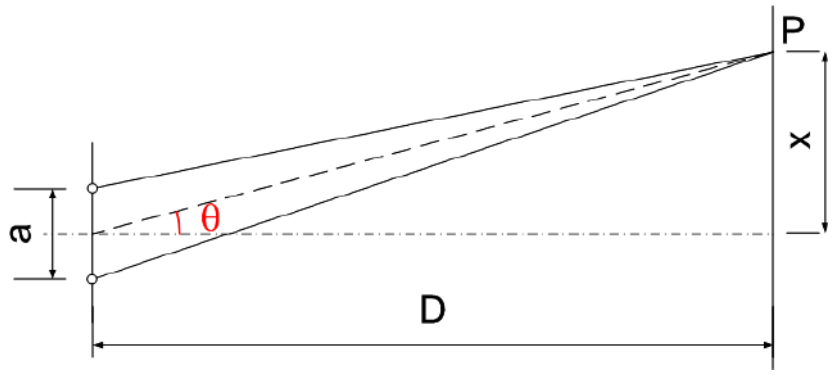


FIGURE 9.20 – Exemple

Solution

1. Un point P, situé à une distance x du centre de l'écran, sera un point où l'éclairement est minimal si :

$$| d_2 - d_1 | = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k \in \mathbb{Z}) \tag{9.7}$$

Comme le schéma 9.20 le montre, nous avons $\tan\theta = \dfrac{x}{D}$. Or l'équation 9.4, nous dit que $d_2 - d_1 = \dfrac{ax}{D}$, donc : $d_2 - d_1 = \tan\theta$.
Remplaçons dans 9.7, et en prenant $k = 0$, nous obtenons :

$$a\tan\theta = (\ 2k+1\ ).\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \quad \theta = \arctan\frac{\lambda}{2a} \approx \frac{\lambda}{2a} \quad \text{car} \quad \lambda <<< a$$

$$\theta = \frac{632.8\times10^{-9}}{2\times0.2\times10^{-3}} = 1.582\times10^{-6}\ \text{rad}$$

2. Pour une frange brillante, nous reprenons l'équation 9.5 :

$$x_k = k\frac{\lambda.D}{a} = 5.\frac{632.8\times10^{-9}}{0.2\times10^{-3}} = 1.58\ \text{cm}$$

9.6.3 Conclusion

L'expérience de Young apporte des arguments majeurs contre la théorie corpusculaire. La théorie ondulatoire triomphe au 19ème siècle et semble avoir remporter le combat. Pourtant, tel un Phénix [2], la théorie corpusculaire renaîtra au 20ème siècle car de nouveaux phénomènes vont être mis en évidence. Tout cela fera l'objet du cours de physique moderne.

2. Le phénix, qui en grec ancien signifie rouge et désigne le point cardinal sud, représente un oiseau fabuleux, doué de longévité et caractérisé par son pouvoir de renaître après s'être consumé sous l'effet de sa propre chaleur. Il symbolise ainsi les cycles de mort et de résurrection.

9.6.4 Applications des interférences

La liste des applications est très grande ; Nous n'en citerons que quelques unes :

- Les interférences en couches minces qui permettent d'expliquer l'apparition des certaines couleurs dans les bulles de savon ou des tâches d'huile. (Voir lecture : Les interférences en couches minces.).

- Phénomène fréquent dans la nature, l'*iridescence* se rencontre notamment chez les insectes (papillons, coléoptères [3], etc.), les oiseaux, les poissons ou les céphalopodes [4], etc. A l'origine de couleurs plus merveilleuses les unes que les autres, l'iridescence n'en est pas pour autant un luxe. Ses couleurs, fruit d'une longue évolution, sont très importantes à la survie de nombreuses espèces, que ce soit pour attirer un partenaire ou faire fuir un prédateur (les signaux ne sont pas perçus de la même façon selon les espèces).

- Le CD dont la lecture se fait par un rayon laser. (Voir lecture : le CD).

- L'holographie est un procédé d'enregistrement de la phase et de l'amplitude de l'onde diffractée par un objet. Ce procédé d'enregistrement permet de restituer ultérieurement une image en trois dimensions de l'objet. Ceci est réalisé en utilisant les propriétés de la lumière cohérente issue des lasers. Le mot holographie vient du grec holos « en entier » et graphein « écrire ». Holographie signifie donc « tout représenter ». L'image change lorsque la position et l'orientation des systèmes de visualisation change exactement de la même manière que si l'objet était toujours présent, donnant ainsi l'impression que l'image enregistrée (hologramme) apparaît en trois dimensions. (Voir lecture : les hologrammes)

- Perturbation de la réception des ondes radio. Si les ondes reçues proviennent de deux émetteurs les ondes vont interférer entre-elles et ainsi fortement perturber la réception des ondes. La solution réside dans le choix de fréquences différentes.

- L'interférométrie est une méthode de mesure qui exploite les interférences intervenant entre plusieurs ondes cohérentes entre elles.
  - En astronomie, L'interférométrie est utilisée en astronomie aussi bien avec des télescopes optiques qu'avec des radiotélescopes. Son avantage est de permettre une résolution équivalente à celle d'un miroir (ou radiotélescope) de diamètre équi-

3. Les coléoptères (Coleoptera) forment l'ordre d'insectes dont les humains ont dénombré le plus d'espèces. Beaucoup d'espèces ou des groupes d'espèces ont des noms vernaculaires bien implantés, les scarabées, coccinelles, lucanes, chrysomèles, hannetons, charançons, carabes par exemple, sont des coléoptères. Ils vivent pratiquement dans tous les biotopes, excepté les milieux polaires et océaniques. Ils possèdent en général deux paires d'ailes. La première paire d'ailes, quelquefois très colorée, les élytres, forme la carapace de ces insectes et la deuxième paire, les ailes membraneuses, servent au vol.

4. Les céphalopodes (Cephalopoda, du grec képhalé, la tête, et pous, podos, le pied) sont des animaux de l'embranchement des mollusques, dont le pied, divisé en bras, surmonte la tête. Peu de céphalopodes disposent d'un nom vernaculaire (nom usuel donné dans la langue locale), cependant hormis quelques céphalopodes, ils peuvent être, selon leurs caractéristiques, désignés par un nom générique. Ainsi les espèces nommées pieuvre, calmar, où seiche sont des céphalopodes.

valent à l'écart entre les instruments combinés. Le contraste des franges permet ensuite d'obtenir une information sur la taille de l'objet observé ou sur la séparation angulaire entre deux objets observés (par exemple, un système étoile - planète). Cette méthode fut d'abord développée dans les années 1970. (Voir figure 9.21)

- Physique moderne : On utilise couramment des interféromètres en recherche dans de nombreux domaines de la physique. Par exemple, des interféromètres de Michelson ont permis de réaliser l'expérience d'interférométrie de Michelson et Morley qui a montré que la vitesse de la lumière est isotrope et indépendante du référentiel, et qui a pu invalider l'hypothèse de l'éther. Des tentatives de détecter les ondes gravitationnelles (comme le projet VIRGO) l'utilisent également.
- Les mesures effectuées avec des interféromètres dépendent souvent de la longueur d'onde. On s'en sert donc en spectrométrie pour déterminer le spectre lumineux de différentes sources de lumière.
- L'interférométrie est aussi utilisée pour estimer la qualité des optiques. En effet dans certaines applications, les optiques utilisées ne doivent pas avoir de défauts (c-à-d : pas de rayures, de bosses, etc). Ainsi, grâce à l'obtention d'une figure d'interférence, il est possible de détecter les défauts d'un verre pour les corriger.
- L'interférométrie est également utilisée dans le domaine de l'acoustique sous-marine : il existe des SONARS par interférométrie.

FIGURE 9.21 – Le Very Large Telescope (VLT) est un ensemble de 4 télescopes principaux et 4 auxiliaires à l'Observatoire du Cerro Paranal, situé dans le désert d'Atacama au nord du Chili, à une altitude de 2 635 mètres. Il permet l'étude des astres dans les longueurs d'onde allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. C'est un projet européen de l'Observatoire européen austral (ESO). Tout comme l'interférométrie radio utilisée depuis de nombreuses années par les radiotélescopes, l'interférométrie optique consiste à regrouper à l'aide d'ordinateurs les prises de vues de plusieurs télescopes pour n'en faire qu'une seule. Cette technique permet de créer virtuellement un plus grand télescope. Dans le cas du VLT, lorsque l'interférométrie optique est utilisée, la précision est telle que l'on pourrait voir un homme sur la Lune.

9.7 Lecture : les interférences en couches minces

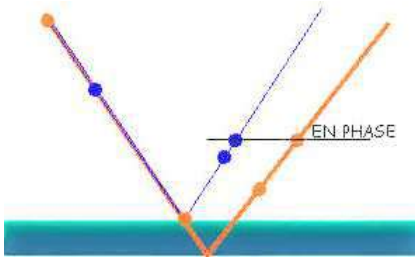


FIGURE 9.22 – Interférences en couches minces. Deux ondes sont en phase lorsque les interférences sont constructives. Si les interférences sont destructives la couleur correspondante disparaît.

Les couleurs que l'on peut observer sur les bulles de savon ou les films d'huile et d'essence sur le sol, l'irisation de certaines parties des plumes de paon ou des ailes de papillon sont dues à des phénomènes d'interférences. Tous ces objets présentent des *couches minces* transparentes. Or lorsqu'une couche mince est éclairée par de la lumière blanche, une partie est éclairée par la première surface et une autre par la seconde surface. (Voir figure 9.22). Il y a interférence des ondes réfléchies.

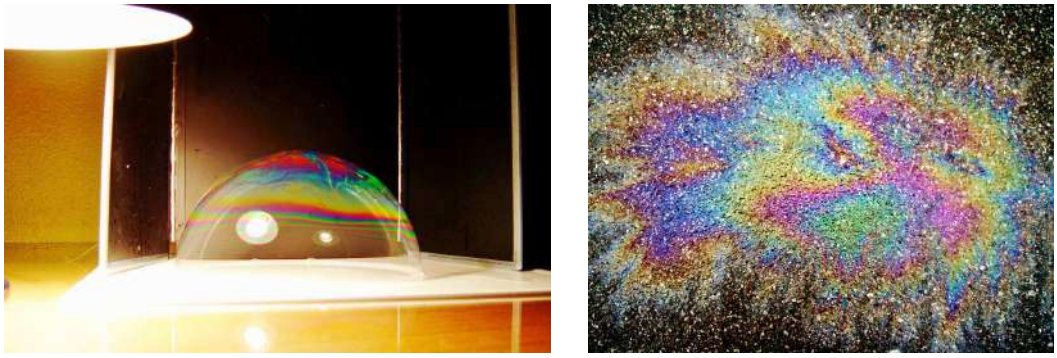


FIGURE 9.23 – (a) Une bulle de savon avec nombreuses couleurs dues à des interférences. (b) Une tâche d'huile sur le sol présentant également des couleurs dues aussi à des interférences.

FIGURE 9.24 – Les plumes de paon présentent des couleurs différentes selon l'orientation selon laquelle on les regarde.

Si l'interférence est destructive pour une certaine longueur d'onde, la lumière réfléchie

a perdu une partie de ses composantes colorées : elle n'est plus blanche. Par exemple, s'il y a interférence destructive pour une lumière dont la longueur d'onde est proche de 400 nm (lumière violette), la lumière apparaîtra jaunâtre. Comme l'épaisseur d'une couche mince varie généralement d'un point à l'autre, les conditions d'interférences destructives et constructives varient d'un point à un autre également. La couche mince présente alors toutes une série de couleurs. Le phénomène de dispersion de la lumière à la surface des disques compacts peut également être interprété par des interférences de lumière.

9.8 Lecture : Le CD

Dans un CD-ROM pré-enregistré, le disque est pour l'essentiel une galette de plastique recouverte d'une fine couche de métal. C'est dans les variations de hauteur de cette couche que sont contenue les information (Figure 9.25 (a)). On distingue les pits (En anglais : les puits) et les lands (En anglais : les terrains). Les pits sont alignés sur une spirale (Figure 9.25 (b)). Pour lire un CD-ROM, on envoi un faisceau laser qui se réfléchit sur la couche

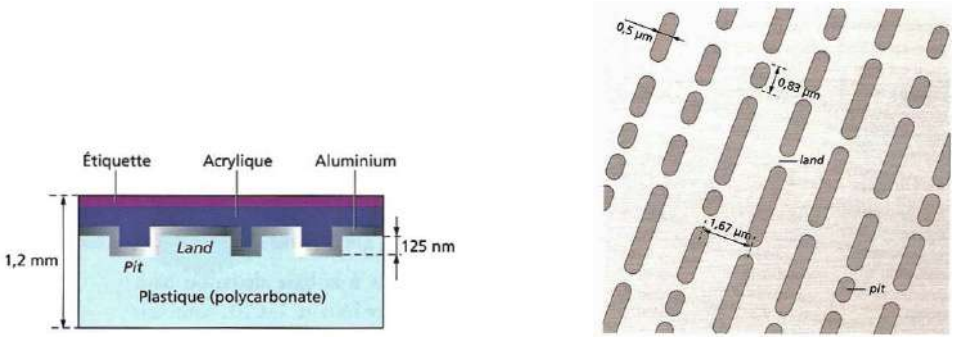


FIGURE 9.25 – (a) Structure d'un CD-ROM pré-enregistré. C'est dans les variations de hauteur de cette couche que sont contenues les informations. On distingue clairement, sur le schéma, les pits et les lands.(b) Les pits sont alignés sur une spirale dont on aperçoit plusieurs bras. Les distances caractéristiques illustrent bien la grande finesse de gravure du CD.

métallique après avoir été réfracté à l'interface air-plastique. (Figure 9.26 (a)). Selon que la lumière est réfléchies par le métal derrière un land ou bien un pit, la distance parcourue n'est pas la même. La différence de hauteur entre land et pit a été ajustée en fonction de l'indice de réfraction du matériau et de la longueur d'onde du laser pour que les maxima d'une des ondes réfléchies correspondent aux minima de l'autre. (Figure 9.26 (b))L'onde réfléchie est alors annulée par interférence destructive. Donc, si le faisceau incident est à cheval sur un land et un pit, la lumière réfléchie est beaucoup plus faible que si la réflexion se fait sur un land ou un pit. Grâce à cette variation d'intensité lumineuse on parvient à retrouver le code binaire original et donc à restituer les sons et images enregistrées sur le disque.

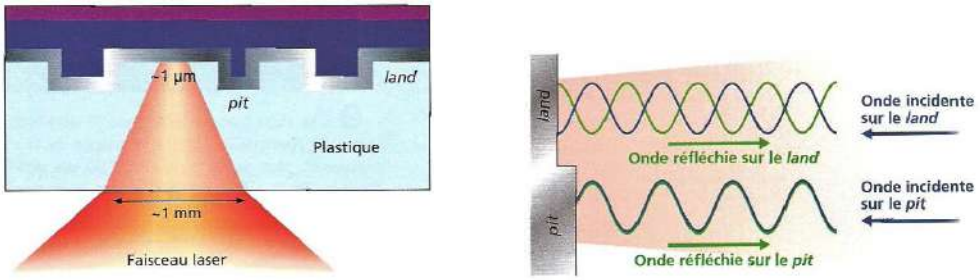


FIGURE 9.26 – (a) Principe de lecture d'un CD-ROM : le faisceau incident se réfléchit sur la couche métallique après avoir été réfracté à l'interface air-plastique. (b) Lorsque le faisceau tombe à cheval sur un pit et un land, l'onde réfléchie par le land est en opposition de phase avec l'onde réfléchie. par interférence destructive, l'intensité de cette partie de l'onde est annulée. Le faisceau réfléchi somme des ondes réfléchies par le land et le pit présente alors un minimum d'intensité.

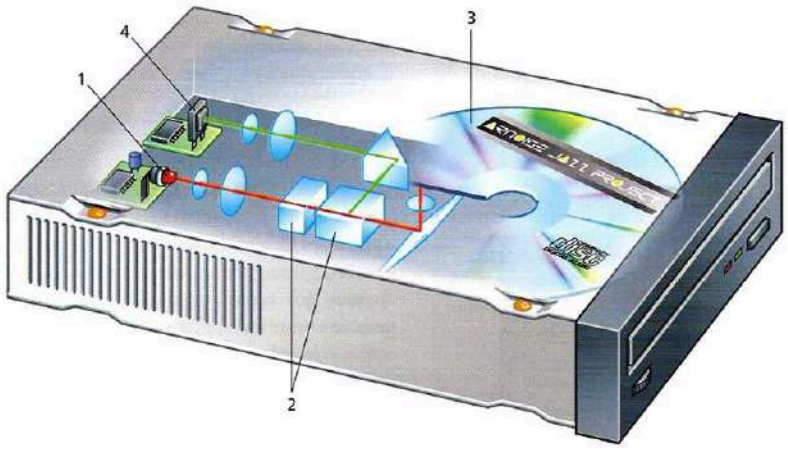


FIGURE 9.27 – Schéma de principe d'un lecteur de CD-ROM. La diode laser (1) émet un faisceau vers le bloc optique motorisé (2) pour lire le CD (3). Une partie de la lumière réfléchie par la surface du disque est collectée par la photodiode (4) afin de reconstituer le code binaire contenue dans le CD.

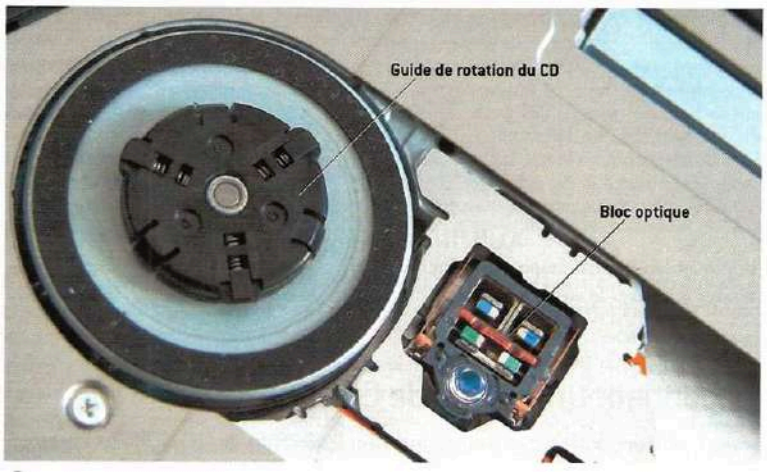


FIGURE 9.28 – Intérieur d'un lecteur CD-ROM. On distingue le bloc optique et la lentille de focalisation du laser, ainsi que le guide permettant de maintenir et faire tourner le disque compact.

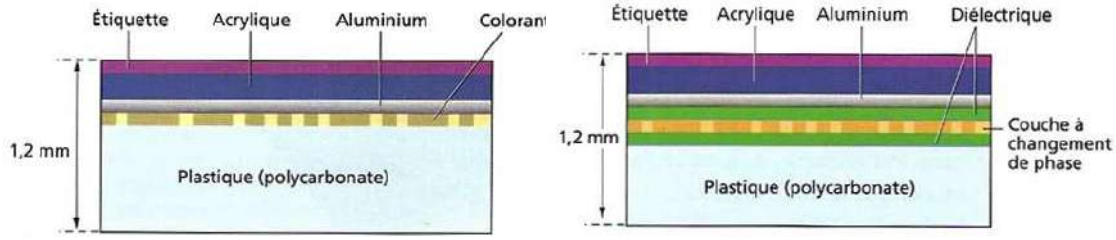


FIGURE 9.29 – (a) Structure d'un CD-R (R étant l'initiale de "recordable", enregistrable en anglais) : les informations sont enregistrées dans la couche de colorant organique qui devient opaque lorsqu'elle est chauffée par le laser. La quantité de lumière réfléchie par la couche métallique derrière une zone de colorant brûlé devient alors très faible. (b) Structure d'un CD-RW : ("Re-Writable", ré-inscriptible en anglais) : la couche contenant l'information est fabriquée dans un matériau spécial dont la formule est tenue secrète par les fabricants. Elle change de phase, et donc de coefficient d'absorption, en fonction de la durée d'illumination et de l'intensité du laser. Cette couche est comprise entre deux autres diélectriques.

9.9 Lecture : les hologrammes.

L'hologramme est le produit de l'holographie. Il s'agit historiquement d'un procédé de photographie en relief. Aujourd'hui, un hologramme représente une image en trois dimensions apparaissant comme « suspendue en l'air ». Le mot hologramme provient du grec holos « en entier » et gramma « lettre ». Les principes de l'holographie furent énoncés par le physicien allemand Albert Einstein en 1922 après qu'il eut découvert des équations évoquant un système photographique tridimensionnel qu'il appela holographie. Le premier hologramme fut construit en 1965 à l'aide d'un laser par Emmett Leith et Juris Upatnieks. Contrairement à la photographie traditionnelle, qui ne contient qu'une information bidimensionnelle, un hologramme contient beaucoup d'informations tridimensionnelles. Il résulte en une image d'interférence entre les ondes issues de l'objet photographié et d'une partie du même faisceau laser utilisée pour éclairer l'objet. Les détails dans l'hologramme sont très petits (inférieurs au micromètre). (Voir figure 9.30). Pour fabriquer un hologramme, il faut :

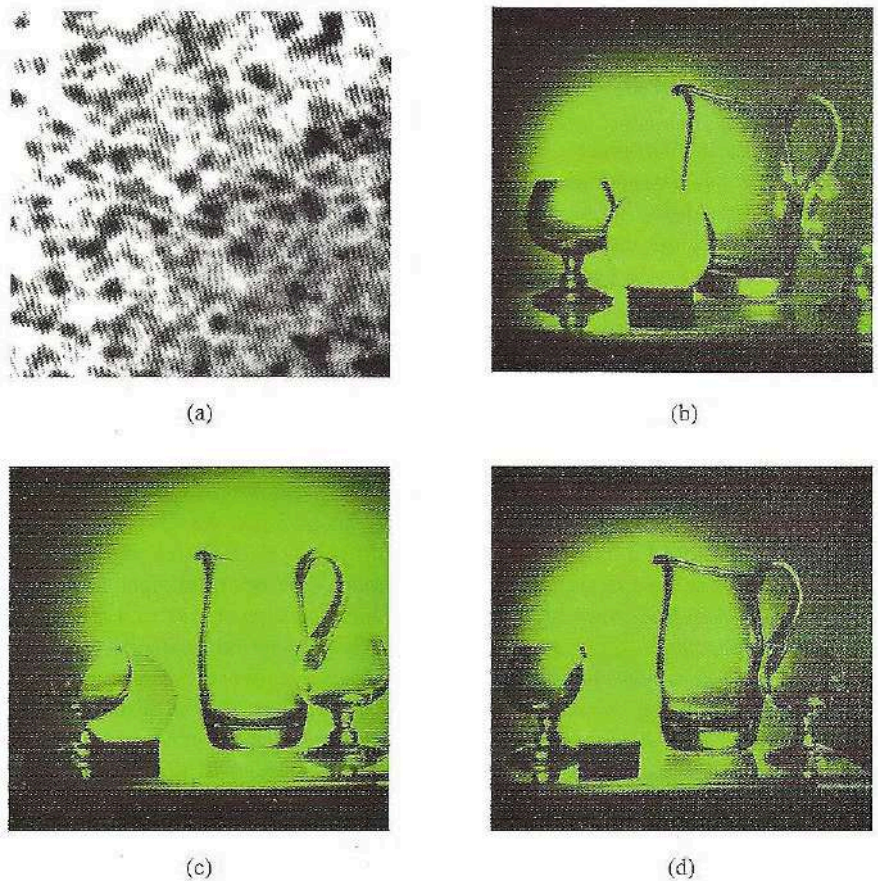


FIGURE 9.30 – (a) L'émulsion d'argent forme une sorte de réseau de diffraction à trois dimensions, qui est l'hologramme. (b), (c) et (d) Trois vues différentes photographiées à partir de la même image holographique de la figure (a). Vous pouvez voir différentes régions de la scène.

- un film photographique,
- un objet à holographier (et non pas photographier),
- un laser de faisceau large.

On sépare le faisceau laser (lumière cohérente) en deux faisceaux : le premier éclaire l'objet qui le diffuse vers la plaque photographique, le deuxième (onde de référence) est réfléchi par un miroir vers la plaque photographique. La lumière réfléchie par l'objet et celle directement issue du laser se rencontrent donc sur la plaque photo - au niveau de la plaque photo, ces deux lumières produisent des interférences. Il y a des endroits où les deux faisceaux arrivent, qui ne sont en fait plus éclairés (les deux faisceaux s'annulent), d'autres où au contraire, les deux faisceaux se renforcent. La plaque photo est impressionnée par ces interférences, et elle les conserve. Lors du développement, les atomes d'argent de l'émulsion de la plaque photographique forment une sorte de réseau de diffraction à trois dimensions. Contrairement à une photographie où seule l'intensité est enregistrée sur la plaque, l'hologramme contient également une notion de distance (phase de l'onde) qui résulte de l'interférence avec le second faisceau. Pour voir l'hologramme, il faut éclairer l'hologramme avec une onde identique à l'onde de référence. (Voir figure 9.31).
Les hologrammes possèdent quelques propriétés étonnantes.

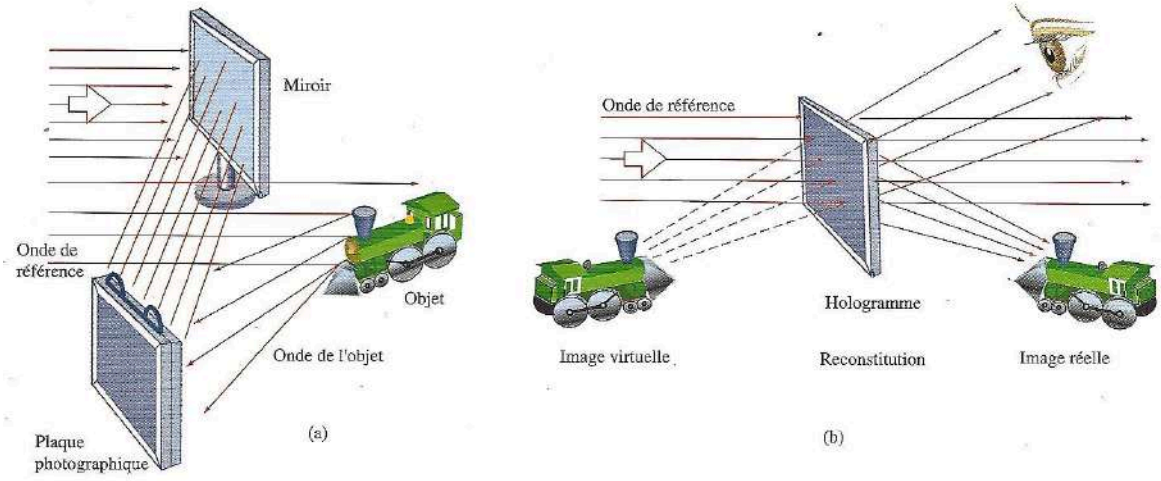


FIGURE 9.31 – Enregitrement et reconstitution d'une image holographique. (a) On partage un faisceau chérent de lumière en deux faisceaux. Le premier éclaire l'objet qui le diffuse vers la plaque photographique et le second (onde de référence) est réfléchi par un miroir vers la plaque photographique. L'interférence de ces deux faisceaux produit l'hologramme après développement . (b) Pour voir l'hologramme, il faut éclairer avec une onde identique à l'onde de référence.

- La première, c'est que la lumière qu'ils renvoient est exactement celle que l'objet éclairé par le laser émettait. Un hologramme, c'est comme une fenêtre sur un objet. C'est pour cela qu'on a vraiment l'impression de voir l'objet en relief : vous ne verrez pas la plaque photo de la même manière selon l'endroit d'où vous la regardez. Comme vos yeux sont à des endroits différents, chacun reçoit bien une image différente. Votre cerveau reconstitue alors le relief, et a l'impression de voir l'objet tel qu'il était, très exactement, au moment ou il a été holographié. On peut même, en changeant de place, tourner autour, et voir des détails d'un côté qui étaient cachés de l'autre ! Si vous holographiez une loupe, et ce qu'elle regarde, l'hologramme vous donnera toujours l'impression que vous regardez à travers une loupe. Il en existe des impressionnants, où l'on peut même regarder dans un microscope holographié. Et ça marche !
- Une seconde propriété, c'est que si vous découpez votre hologramme, sur chaque petit morceau d'hologramme, vous verrez l'objet en entier. Comme si vous aviez découpé une fenêtre en morceaux : par chaque morceau, vous pouvez voir tout ce qu'il y a derrière - à condition de regarder avec le bon angle. Donc un morceau d'hologramme est comme une petite fenêtre. A quand les puzzles en hologrammes ?

On pense que le cerveau humain fonctionne d'une façon analogue et que la mémoire est, en se sens holographique. On notera aussi qu'on appelle aussi, à tort, « hologrammes » les dispositifs que l'on appose sur des cartes bancaires, billets, passeports ou boîtes de logiciel. Leurs caractéristiques sont difficiles à reproduire par des faussaires. Ils ne contiennent pas d'information 3D. Le relief apparent s'inverse quand on tourne le dispositif de 180° (la tête en bas). Le relief disparaît si l'on tourne de 90°.

9.10 La diffraction de la lumière

9.10.1 Introduction

Le paragraphe précédent sur les interférences nous a donné un argument de poids en faveur de la nature ondulatoire de la lumière. Si tel est le cas, alors, il devrait être possible d'observer également une figure de diffraction de la lumière. Ceci donnerait un argument supplémentaire en faveur de la théorie ondulatoire.

Cependant, pour obtenir un phénomène de diffraction, nous savons que les dimensions de l'orifice ou de l'obstacle doit être du même ordre de grandeur que la longueur d'onde, c'est-à-dire des longueurs inférieures au micromètre. Il est évident que de telles dimensions sont très difficile à réaliser. Nous ne parviendrons pas à réaliser ces conditions expérimentales idéales mais nous nous en rapprocherons le plus possible de façon à obtenir un peu de diffraction.

La diffraction de la lumière dut découverte vers 1660 par Franceso Maria Grimaldi mais il fallut attendre Augustin Fresnel (page 30) et Joseph von Fraunhofer qui apportèrent une explication convaincante en appliquant la théorie d'Huygens (page 101).

FIGURE 9.32 – (a) Francesco Maria Grimaldi, né le 2 avril 1618 à Bologne (Italie) et décédé le 28 décembre 1663 à Bologne, était un prêtre jésuite italien, physicien et astronome de renom. (b) Joseph von Fraunhofer est un opticien et physicien allemand (né le 6 mars 1787 à Straubing, en Bavière, et mort à Munich le 7 juin 1826). Il fut l'inventeur du spectroscope avec lequel il repéra les raies du spectre solaire.

9.10.2 Observations

la diffraction lumineuse s'observe très simplement en plaçant près de l'oeil deux doigts rapprochés et en regardant en direction d'une lumière intense. On observe des bandes étroites alternativement claires et obscures. L'observation au laboratoire peut se faire en intercalant des objets entre une petite source lumineuse (fente de 1 mm de largeur par exemple) et un écran.

Par exemple :

– Une fente (Voir figure 9.34).

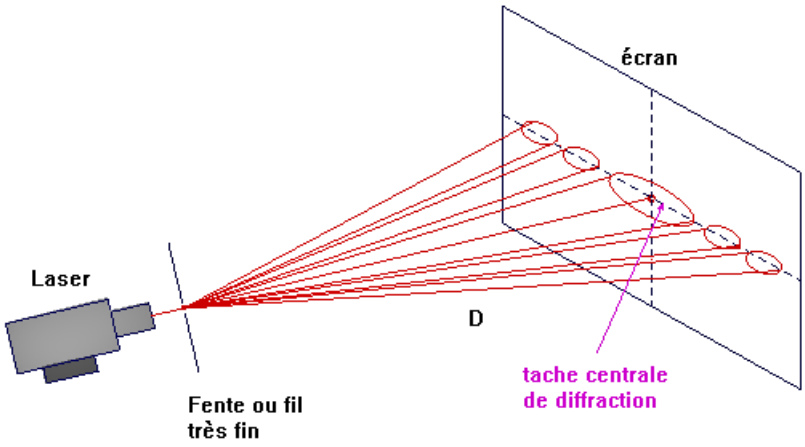


FIGURE 9.33 – Dispositif expérimental pour observer la diffraction de la lumière. Un faisceau de lumière monochromatique est envoyé à travers une petite fente ou bien sur un fil très fin. Sur l'écran, on peut voir des franges caractéristiques du phénomène de diffraction.

– Une tête d'épingle (Voir figure 9.35).
– Une lame de rasoir (Voir figure 9.37).
– Un trou carré[5] (Voir figure 9.34).

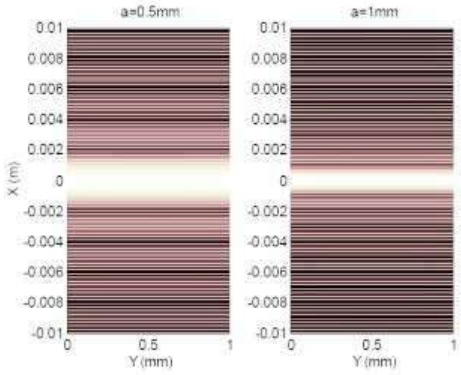


FIGURE 9.34 – Plus l'ouverture de la fente diminue plus la figure de diffraction est étalée. En particulier il importe de remarquer que la bande centrale est deux fois plus large que les bandes latérales et qu'il est très intense par rapport à ceux-ci. L'absence de lumière en certains endroits de la figure confirme la nature ondulatoire de la lumière.

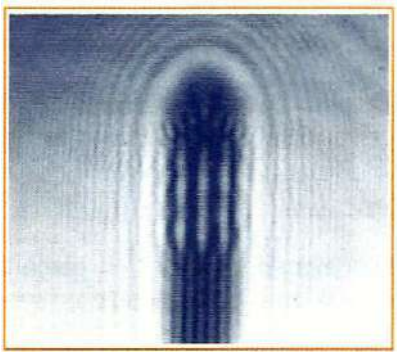


FIGURE 9.35 – Figure de diffraction obtenue à partir d'une tête d'épingle.

5. Les figures de (a) à (e) sont dites diffraction de Fresnel. La figure (f) est dite diffraction de Fraunhofer qui se caractérise par une lumière incidente plan et un écran à l'infini. Dans ce cours, nous ne traiterons que les diffractions de Fraunhofer car les diffractions de Fresnel sont nettement plus compliquées à calculer.

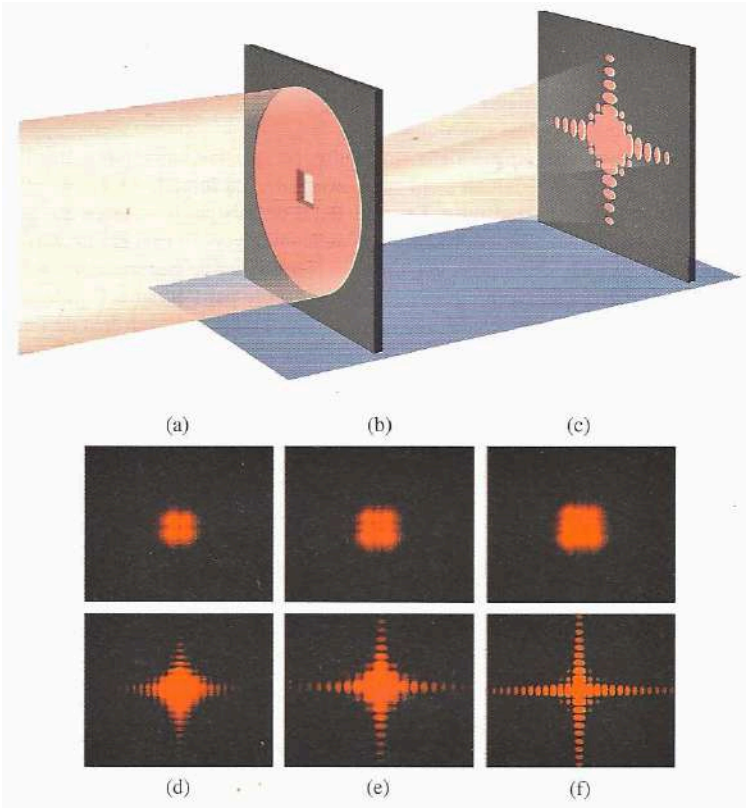


FIGURE 9.36 – Figure de diffraction produite par une ouverture carrée unique. On a progressivement réduit l'ouverture. L'ouverture est éclairée par une onde plane laser à He-Ne et l'écran d'observation est maintenu fixe.

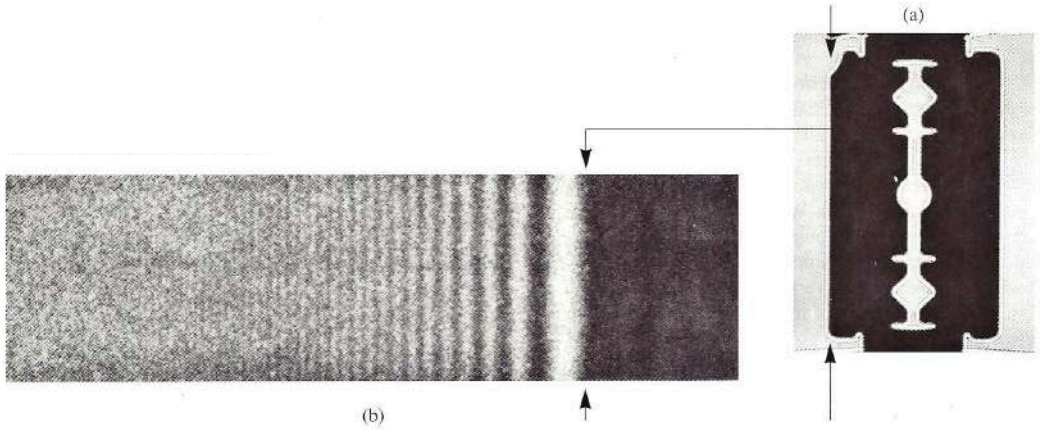


FIGURE 9.37 – (a) Ombre réelle d'un rasoir illuminé par derrière par une lumière monochromatique ponctuelle. (b) Vue fortement élargie de la zone d'ombre près du bord du rasoir. On voit nettement des stries alternativement claires et obscures. Les flèches indiquent la position géométrique de l'ombre.

9.10.3 Diffraction par une fente

Observations

On observe des bandes claires et obscures sur l'écran. La bande centrale claire est nettement plus marquée que les autres bandes, elle comprend environ 90% de la lumière émise par la fente. De plus, on remarque que plus la fente est étroite et plus la bande centrale est large et intense. La distance entre deux tâches claires augemnte également.

Etude mathématique

Soit une source ponctuelle de lumière monochromatique de longueur λ éclairant une fente très petite. La distance ente la source ponctuelle étant très grande comparée à la largeur L de la fente, par exemple respectivement 800 mm et 0.1 mm, on peut faire l'approximation que tous les points de la fente reçoivent au *même instant* l'onde issue de la source. D'après la principe de Huygens, tous ces points deviennent alors des *sources secondaires en phase* et émettent donc de nouvelles ondes dans toutes les directions.
En un point P quelconque de l'écran viennent se superposer les ondes émises par tous les points de la fente. Comme ces ondes ont suivi des chemins différents, en certains points P les ondes vont interférer constructivement pour donner lieu à un éclairement maximal (bandes claires). En d'autres points P, elles vont interférer destructivement et vont donner lieu à un éclairement minimal (bandes obscures).
Déterminons dans quelle(s) direction(s) vont se trouver les minima de diffraction.

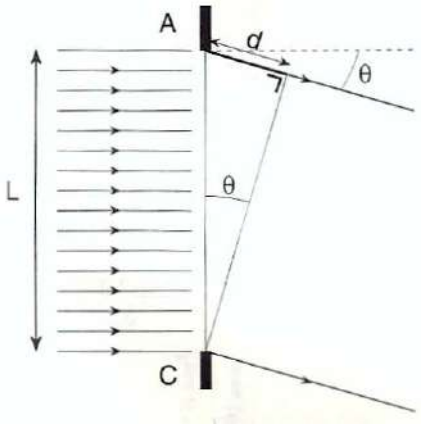


FIGURE 9.38 – Détermination de la différence de marche. $d = l \sin\theta$

Nous savons qu'une interférence destructive résulte de la superposition de deux ondes qui sont en opposition de phase c'est-à-dire si la différence de marche vaut un nombre impair de demi-longueur d'onde. Comme la distance fente écran est très grande par rapport à la largeur de la fente, nous pouvons considérer que les rayons issus de la fente sont pratiquement parallèles. La figure 9.38 montre que la différence de marche d entre les ondes issues de A et celles de C vaut :

$$d = l \sin\theta$$

a) si $d = \lambda$ Divisons la fente en deux parties égales (Figure 9.39a). AB et AC. Dans ce cas,

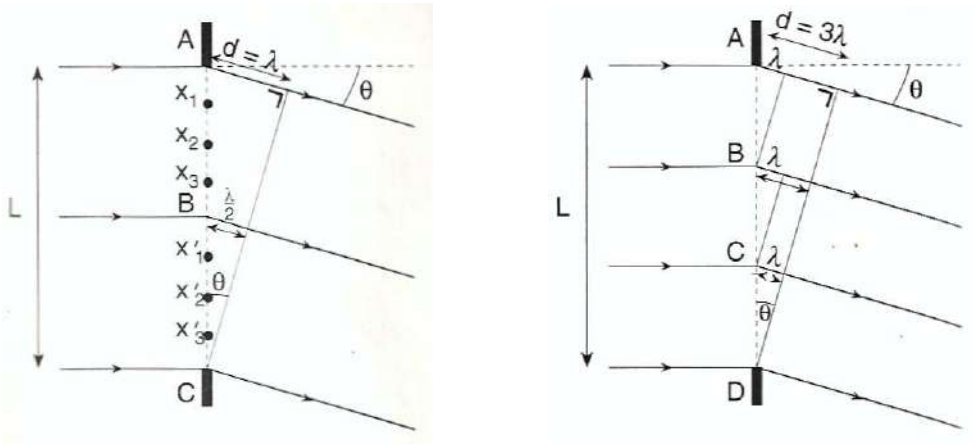


FIGURE 9.39 – (a) Cas où la fente est divisée en deux parties égales. (b) Cas où la fente est divisée en trois parties égales.

- les ondes issues de A et B sont en opposition de phase et interfèrent destructivement,
- les ondes issues des points x_1 et $x_1^{'}$ vont elles aussi interférer destructivement car leur différence de phase vaut $\frac{\lambda}{2}$,
- même chose pour les ondes issues des points x_2 et $x_2^{'}$, des points x_3 et $x_3^{'}$, etc.

Toutes les paires d'ondes interférant destructivement, on peut en déduire que l'onde résultante (qui est la somme de toutes les paires d'ondes) a une amplitude nulle. **Il y a donc extinction pour l'angle θ tel que** $d = L\sin\theta = \lambda$, ou encore :

$$\boxed{\sin\theta = \frac{\lambda}{L}} \tag{9.8}$$

a) si $d = k\lambda$ avec k entier Prenons par exemple $k = 3$. Divisons la fente en trois parties égales (Voir figure 9.39b) : AB, BC et CD. Tout se passe en alors comme si avions trois fentes, chacune d'elle donnant lieu à une onde résultante d'amplitude nulle puisque les différences de marche correspondant au parcours des ondes issues des deux points extrêmes de chaque fente vaut λ. **Il y a donc extinction pour l'angle θ tel que** : $d = L\sin\theta = 3\lambda$ ou encore $\sin\theta = \frac{3\lambda}{L}$.
De manière générale, **il y a extinction pour des angles tels que** :

$$\boxed{\sin\theta = k\frac{\lambda}{L} \quad \text{où } k = \pm1, \pm2, \pm3, \text{ etc}} \tag{9.9}$$

- Si L diminue alors les angles θ pour lesquels il y a extinction augmentent. Autrement dit, l'étalement de la figure de diffraction est plus important si la fente est plus petite.
- L'angle θ dépend de la longueur d'onde et donc deux lumières monochromatiques donneront des figures de diffraction différentes.
- Pour $\theta = 0$ et donc $d = 0$, il n'existe aucune différence de phase entre les différentes ondes. L'interférence est donc constructive et nous obtenons une amplitude maximale

dans cette direction de l'écran. L'intensité de la lumière sur l'écran est donné à la figure 10.20. Nous noterons que le maximum central a approximativement une largeur double des autres. (Voir figure 9.40).

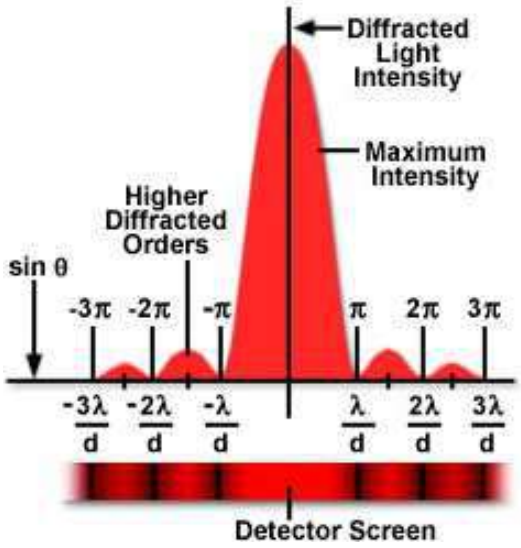


FIGURE 9.40 – Au dessus : représentation graphique de l'intensité relative, dans le cas de la diffraction à travers une fente unique. Notez que la largeur du pic principal est le double de celle d'un maximum secondaire. Sur le graphique, l'axe des coordonnées est graduée en fonction de la valeur de $\sin\theta$. Au-dessous : la figure de diffraction telle qu'elle est obtenue sur l'écran.

Remarque. Dans l'équation 9.9, poser $k = 0$ n'a aucun sens.

Exemple Une fente unique de largeur 0.10 mm est éclairée par une onde plane d'un laser He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm). Si l'écran d'observation est à 10 m, déterminez la largeur du pic central (Définie comme la distance entre les centres des deux premiers minimums de part et d'autre du maximum central).

Solution Les deux minimums de part et d'autre du maximum central correspondent à $k = \pm 1$. Reprenons alors l'équation 9.8 :

$$\sin\theta_1 = \frac{\lambda}{L} = \frac{632.8 \times 10^{-9}}{1.0 \times 10^{-4}} = 632.8 \times 10^{-5} \quad \Rightarrow \quad \theta_1 = 0.36\check{r} = 6.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

Le pic central a donc une largeur angulaire de $2(6.3 \times 10^{-3}$ rad). Comme la demi-largeur est $D(\tan\theta_1) = D.\theta_1$ (si l'angle est petit et en radians $\sin\theta = \tan\theta = \theta$), la largeur linéaire du maximum central est :

$$2d\theta_1 = 10 \times 0.0126 = 0.13 \text{ m}$$

Applications

1. Diffraction et interférence.

   – Si la fente devient étroite, la figure de diffraction s'élargit et le pic central devient plus large. En fait, dans l'expérience de Young, par exemple, deux fentes très étroites sont utilisées. Chacune seule produit une figure de diffraction avec un

pic central assez large. Les franges d'interférence des deux fentes se forment dans la région commune aux deux pics centraux de diffraction des deux fentes. (Voir figure 9.41). Un exemple de calcul est donné au paragraphe suivant.

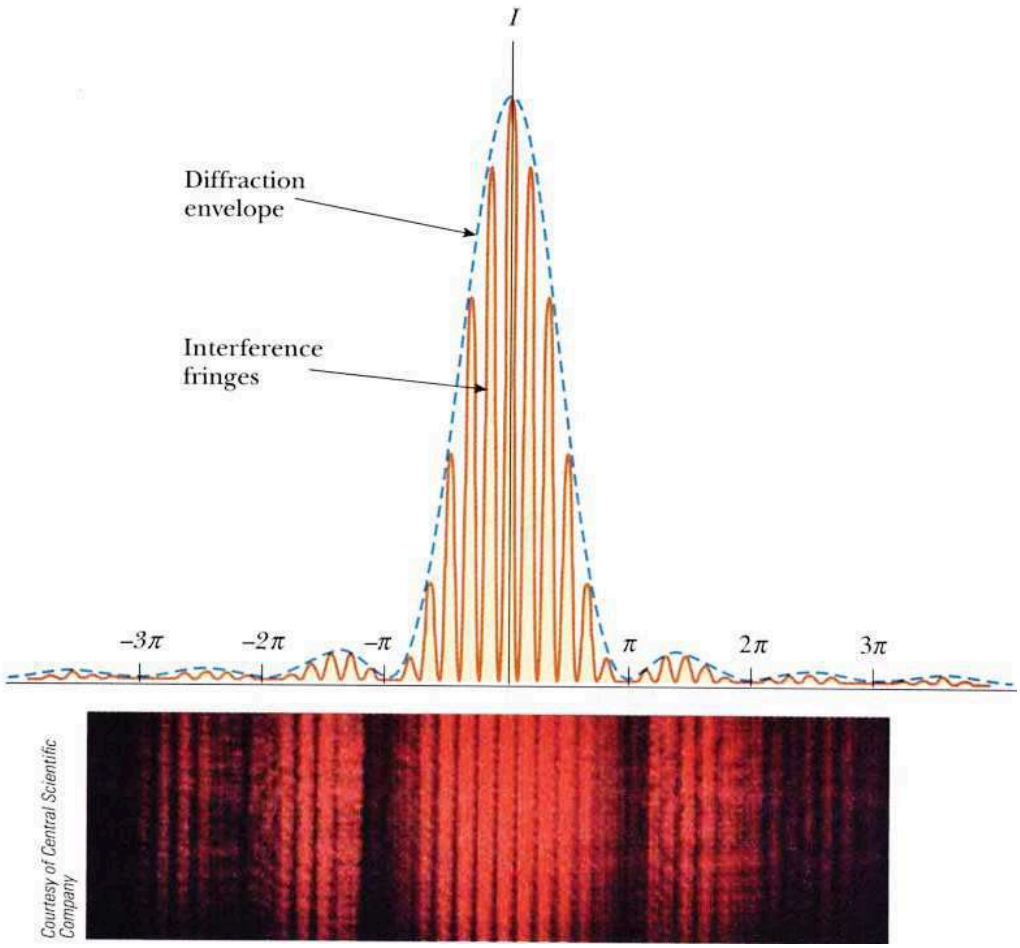


FIGURE 9.41 – Effet combiné entre une interférence (2 fentes) et une diffraction (1 fente). La figure est produite à partir d'une lumière de 650 nm de longueur d'onde pour des fentes de 3.0 μm de largeur et espacées de 18 μm. Notons que la diffraction forme une enveloppe de la figure d'interférence et contrôle les maximas d'interférences régulièrement espacés.

Exemple - Diffraction et interférence. Considérons une lumière monochromatique bleue de longueur d'onde $\lambda = 0.5\mu$m. On envoie cette lumière sur deux fentes de 0.1 mm de largeur et séparées d'une distance de $a = 0.5$ mm. L'écran se situe à 2 mètres des fentes. Déterminer le nombre de franges d'interférence comprises entre la première extinction à gauche du minimum central de diffraction et la première extinction à droite.

Solution La distance entre la première extinction à gauche et le maximum central d'une fente est donnée par :

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{L} = \frac{500\times10^{-9}}{0.1\times10^{-3}} = 5\times10^{-3} \quad \Rightarrow \quad \theta = 0.29°$$

$$x = D.\tan\theta = 1 \text{ cm}$$

La distance entre deux franges d'interférence vaut :

$$i = \frac{\lambda D}{a} = \frac{500\times10^{-9}\times 2}{0.5\times10^{-3}} = 0.2 \text{ cm}$$

La figure de diffraction de la seconde fente recouvre presque exactement celle de la première fente puisque $2x$ est beaucoup plus grand que l'intervalle entre les fentes. le nombre de franges d'interférence comprises entre la première extinction à gauche du maximum central et la première extinction à droite vaut donc :

$$n = \frac{2x}{i} = \frac{2}{0.2} = 10$$

2. Limite de grossissement des microscopes et des télescopes.

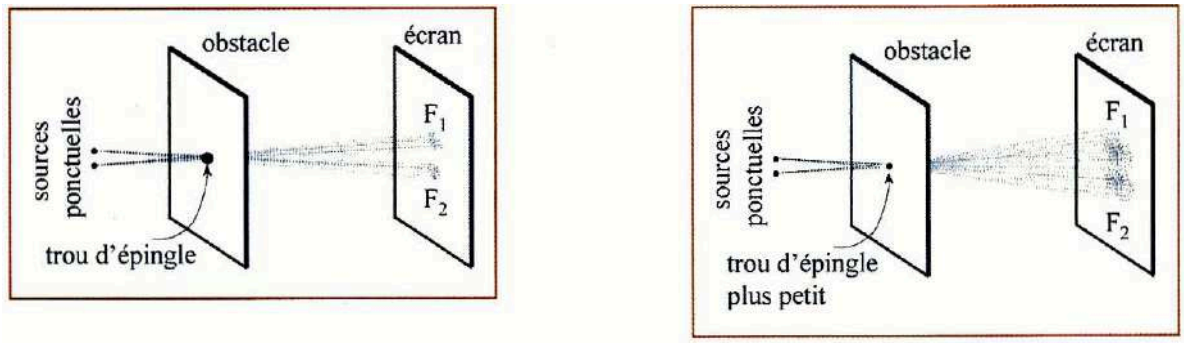


FIGURE 9.42 – Lorsque le diamètre du trou diminue, le phénomène de diffraction empêche de voir les sources séparément.

– Soient deux sources ponctuelles très proches l'une de l'autre et envoyant de la lumière sur un obstacle percé d'un petit trou (Voir figure 9.42). Vu l'étroitesse du trou, nous obtenons les figures de diffraction F_1 et F_2 sur l'écran. En diminuant le diamètre du trou, nous observons sur l'écran des imagées encore plus étalée, de sorte qu'elles finissent pas empiéter l'une sur l'autre. Si cet empiètement est trop fort, on ne peut plus distinguer les images de ces deux points. On dit que le système ne peut plus séparer les deux images. Elles ne sont plus résolues. Ce phénomène est le même si on remplace le trou par une lentille de dimension finie. (Voir figure 9.43). Ceci explique qu'il y a une limite au pouvoir séparateur d'un microscope optique ou bien d'un télescope. [6]

6. Quelques pouvoirs de résolution à titre indicatif : l'oeil 1 mm à 6 m ou 53 m à 200 km ; les jumelles 1.7 m à 200 km ; Hubble 55 mm à 200 km ou 107 m sur la Lune ; le VLT 16 mm à 200 km et 32 m sur la Lune. En interférométrie, on pourrait créer une télescope équivalent à un télescope 80 m de diamètre et qui aurait une résolution de 1.7 mm à 200 km et 3 m sur la Lune.

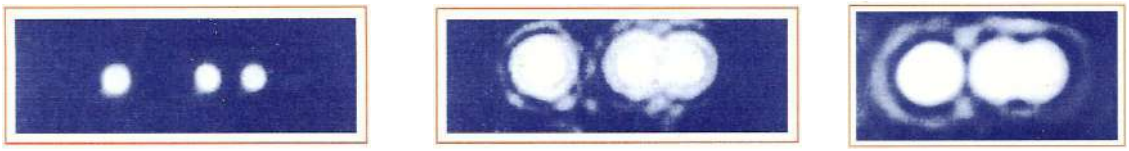


FIGURE 9.43 – Les figures montrent les images ponctuelle obtenues en utilisant des lentilles de diamètre différent. Plus le diamètre diminue (de gauche à droite), moins la résolution est bonne.

3. Colorisation de la lumière réfléchie par certaines surfaces, par exemple un CD.

   – La rugosité de surface engendre une réflexion diffuse. (Voir figure 9.44). Lorsque la rugosité est un motif répétitif régulier dont la dimension est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière incidente, une partie de la lumière incidente va se diffracter. La partie de la lumière que ne se diffracte pas est dite composante spéculaire et suit les lois de la réfexion.

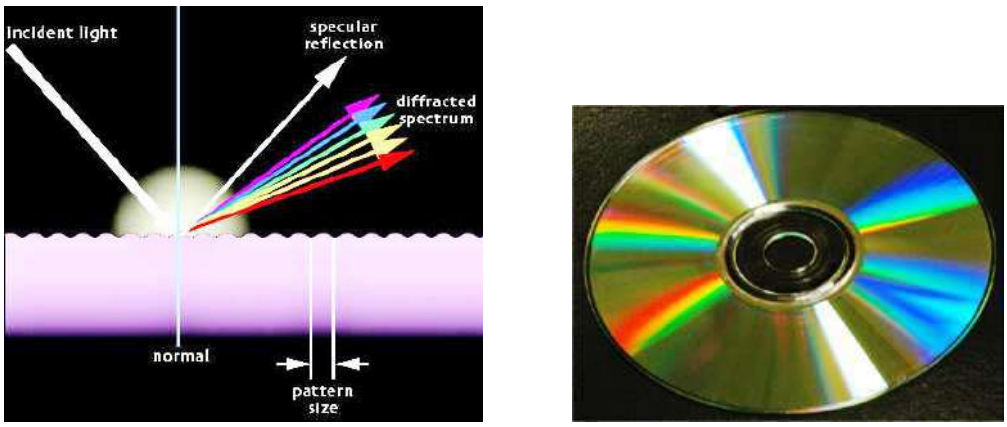


FIGURE 9.44 – (a) Sur une surface rugueuse, une partie de la lumière incidente suit la loi de la réflexion, c'est la composante spéculaire. Une autre partie est diffracté. Comme la diffraction dépend de la longueur d'onde, il y séparation des couleurs. (b) Diffraction obtenue par de la lumière blanche réfléchie sur un CD.

4. Dans la nature, il est fréquent de rencontrer des phénomènes de diffraction. Par exemple, la lumière du Soleil vue à travers des arbres (Voir figure 9.45) ou bien chez de nombreux animaux comme certains papillons. (Voir figure 9.46).

FIGURE 9.45 – Diffraction de la lumière du Soleil à travers les arbres.

FIGURE 9.46 – Morpho Peleides : spectaculaire papillon des forêts tropicales d'Amérique du Sud. Il étonne par la couleur bleu-métallique de ses ailes provoquée par diffraction de la lumière sur les millions de petites écailles qui les recouvrent. En vol, leurs battements provoquent des scintillements qui gênent et font fuir les oiseaux prédateurs. Mon revers, sombre et plus discret, est doté d'imposantes ocelles destinées elles aussi à effrayer les prédateurs. Ces moyens de défenses sont complétés par un parfum particulier et désagréable qui se dégage d'une glande située à l'extrémité des pattes antérieures. Il se nourrit essentiellement de fruits mûrs en décomposition. Sa durée de vie est de deux mois environ.

9.10.4 Diffraction par un réseau

Un **réseau** est constitué d'un grand nombre de fentes fines, parallèles et équidistantes. Le dispositif expérimental consiste simplement à envoyer une lumière sur le réseau et d'observer la figure obtenue sur un écran. (Voir figure 9.47)

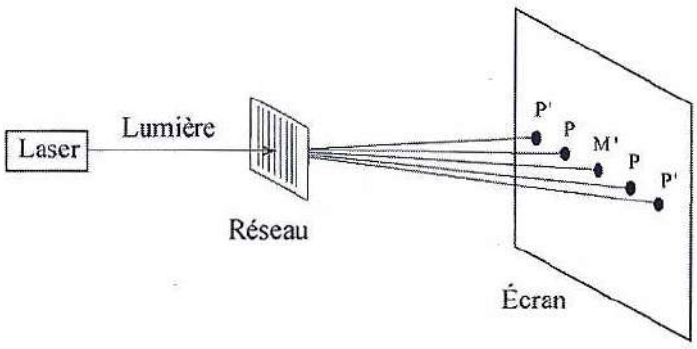


FIGURE 9.47 – Dispositif expérimental. Un faisceau lumineux tombe sur un réseau et une figure de diffraction est obtenue sur l'écran.

Observations

Un phénomène intéressant apparaît dès que le nombre de fentes parallèles (distantes de a) est supérieur à deux. (Voir figure 9.48). On toujours une diffraction par chaque fente et, dans la région commune aux pics centraux de toutes ces fentes, on trouve des maxima aux mêmes positions que dans l'expérience de Young, mais dans le cas présent ces *maxima*

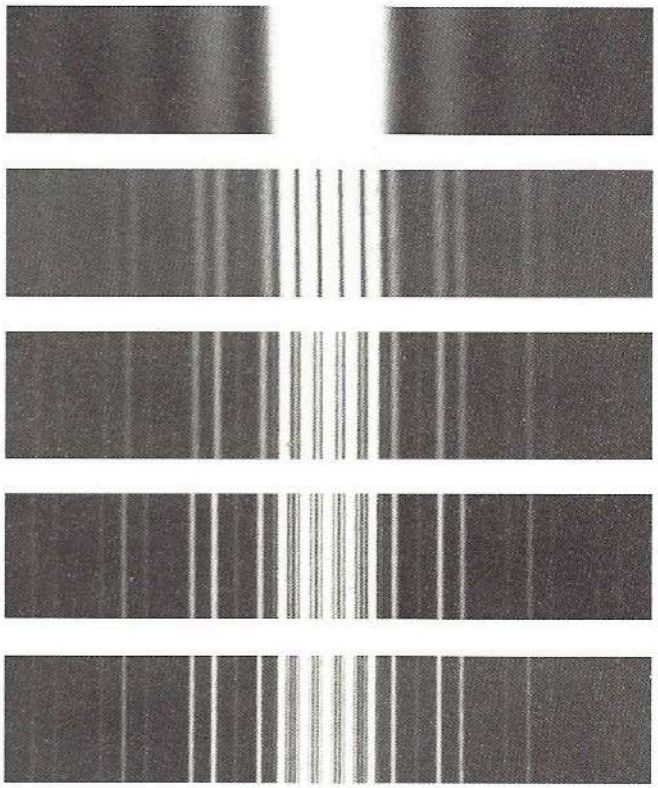


FIGURE 9.48 – Figures de diffraction pour (a) une fente, (b) deux fentes, (c) trois fentes, (d) quatre fentes et (e) cinq fentes verticales symétriques et équidistantes. Notez que les maxima pour des systèmes à plusieurs fentes sont aux mêmes endroits dans dans le cas de deux fentes. Plus le nombre de fentes est grand, plus fins sont les maxima et moins intenses sont les maxima secondaires. S'il y a des milliers de fentes, les maxima principaux sont très fins et ils paraissent séparés par des régions noires.

principaux sont plus étroits et un certain nombre de *maxima secondaires* de faible intensité s'intercalent entre eux. Quand il y a des milliers de fentes, les maxima principaux sont pratiquement bien séparés par des zones noires où aucune lumière n'arrive. De plus, les maxima principaux sont de plus en plus intenses. (Voir figure 9.49)

Etude mathématique

Chaque fente produit une figure de diffraction et donc la formule 9.8 est d'application (Voir figure 9.50) :

$$d = a.\sin\theta$$

On s'attendrait à voir de la lumière presque partout sur l'écran compte tenu de la diffraction par un grand nombre de fentes fines. En fait, on observe presque partout de l'obscurité. En effet :

- si d est un nombre entier de longueur d'onde, alors les ondes arrivent en phase en P. Il y a interférence constructive.
- si on choisit des différences de marche qui ne sont pas un multiple de λ alors le déphasage n'est pas égale à $2k\pi$. Les ondes vont alors se détruire quasi-mutuellement.

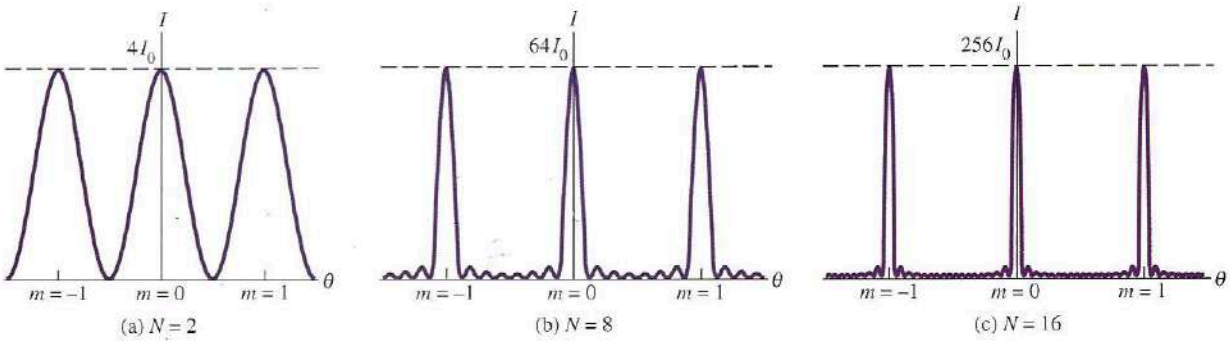


FIGURE 9.49 – Intensité de diffraction pour N fines fentes équidistantes. (a) deux fentes, un minimum apparaît entre les maxima adjacents, (b) huit fentes, sept minima apparaissent entre deux grands maxima. Notez que la largeur des maxima principaux est réduite et que l'intensité des maxima principaux est multipliée par 16 (c) seize fentes. L'intensité des maxima principaux est multiplié par 64. Notes : (1) l'échelle des intensités est différente sur chaque graphique. On peut montrer que l'intensité est proportionnelle à N^2 et que la largeur de chaque pic est proportionnelle à $1/N$. (2) Sur ces graphiques, lire k au lieu de m.

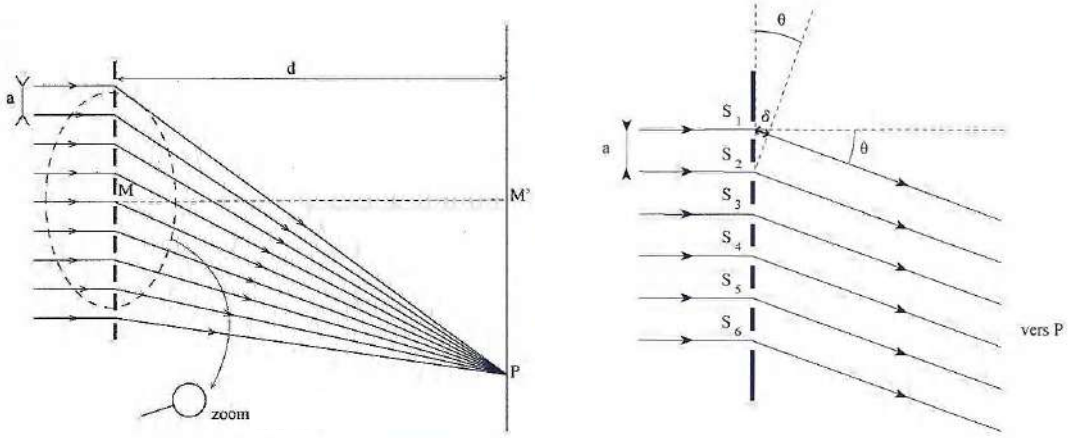


FIGURE 9.50 – (a) Chaque fente de largeur a produit une diffraction sur l'écran placé à une distance d. (b) Zoom de la zone des fentes. Comme a est très petit par rapport à d, on peut considérer les rayons issus de chaque fente comme tous parallèles.

On obtient donc un maxima d'intensité lorsque :

$$\boxed{\sin\theta = k\frac{\lambda}{a} \quad \text{où } k = 0;\ k = \pm 1, \pm 2, \pm 3,\ \text{etc}} \tag{9.10}$$

k définit l'*ordre du spectre*. Par exemple, si $k = 1$, le spectre est dit d'ordre 1.

Exemple La lumière d'une étoile éloignée entre dans un télescope et elle est diffractée par un réseau situé sur l'axe central du télescope. On focalise ensuite chaque composante de la lumière dispersée par le réseau sur une pellicule photographique et on mesure sa déviation. On trouve qu'un faisceau rouge (d'une lumière appelée raies α de l'hydrogène)

a un premier maximum non central à un angle de 25.93°. Les lignes du réseau sont distantes de 1.50×10^{-6} m. Quelle est la longueur d'onde de cette lumière rouge ?

Solution Il suffit d'appliquer la formule 9.10 avec $k = 1$:

$$\lambda = \frac{a \sin\theta}{1} = \frac{1.50 \times 10^{-6} \times \sin 25.93^\circ}{1} = 656 \text{ nm}$$

Exemple : Détermination de la longueur d'onde d'une lumière monochromatique Sur un écran placé à 30 cm, une lampe à vapeur de mercure, la position du spectre de premier ordre est à 9.7 cm du centre. Sachant que le réseau utilisé a 5700 fentes/cm, quelle est la longueur de la lumière observée ?

Solution Nous savons que si $k = 1$, alors $\lambda = a \sin\theta$. D'autre part : $\cot\theta = \frac{D}{x}$ et $1 + \cot^2\theta = \frac{1}{\sin^2\theta}$. Donc :

$$\sin^2\theta = \frac{1}{1+\cot^2\theta} = \frac{1}{1+\frac{D^2}{x^2}} \Rightarrow \sin\theta = \frac{x}{\sqrt{x^2+D^2}} \Rightarrow \lambda = \frac{ax}{\sqrt{x^2+D^2}}$$

Ce qui donne :

$$\lambda = \frac{\frac{10^{-2}}{5700} \times 9.7 \times 10^{-2}}{\sqrt{(9.7 \times 10^{-2})^2 + 0.30^2}} = 540 \text{ nm}$$

C'est donc de la lumière verte.

9.11 Exercices

1. On effectue une expérience de Young en utilisant la lumière rouge d'un laser. Les conditions expérimentales sont les suivantes : $a = 0.85$ mm ; $i = 2.3$ mm ; $D = 3,1$ m. Calculer la longueur d'onde et la fréquence de la lumière utilisée.
   (Rép : 631 nm ; 475 THz).

2. A partir de l'observation des figures d'interférences obtenues en lumière rouge et en lumière bleue (Voir figure 9.18), montrer que la valeur de la longueur d'onde de la lumière bleue est plus petite que celle de la rouge. Les conditions expérimentales étant les mêmes.

3. La lumière rouge d'un laser à He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm) tombe dans l'air sur un écran muni de deux fentes étroites, horizontales distantes de 0.100 mm. On observe une figure d'interférence sur un écran placé à une distance de 2.00 m. A quelles distances (en mm) au-dessus et en-dessous de l'axe central de cet écran se situent les deux premiers zéros d'intensité ?
   (Rép : ± 6.33 mm)

4. Deux fentes parallèles distantes de 0.100 mm sont éclairées par une onde lumineuse plane quasi monochromatique. On trouve que la cinquième frange brillante est à un angle de 1.20°. Quelle est la longueur d'onde de la lumière ?
(Rép : 419 nm)

5. Des rayons parallèles de la lumière bleue d'un laser à argon ($\lambda = 487.99$ nm) tombent sur un écran contenant deux fentes très étroites distantes de 0.200 mm. Une figure d'interférence apparaît sur une écran placé à une distance de 1.00 m. A quelle distance (en mm) de l'axe central se situe le quatrième maximum d'intensité ?
(Rép : 9.76 mm)

6. La lumière blanche éclaire deux fentes étroites et longues et l'on observe l'interférence sur un écran éloigné. Si la frange rouge ($\lambda = 780$ nm) du premier ordre se trouve à la même position que la frange violette du second ordre, quelle est la longueur d'onde du violet ?

7. Une lumière monochromatique de longueur d'onde 500 nm éclaire une fente de 0.15 mm de largeur. A quel angle se trouve la première extinction à gauche du maximum central ? Sur un écran placé à 2 m de distance, quelle sera la largeur de la bande centrale éclairée ?
(Rép : 0.19° ; 10^{-3} m)

8. Envoyons une lumière monochromatique de longueur d'onde 650 nm sur deux fentes de 0.03 mm de largeur et séparées d'une distance de 0.2 mm. L'écran se trouve à 2 mètres des fentes. Combien y a-t-il de franges d'interférence comprises entre le premier zéro à gauche du maximum central et le premier zéro à droite ?
(Rép : 14)

9. Un réseau possède 10 000 traits pour une longueur de 5 cm. Calculer l'angle correspondant à la raie violette du second ordre. ($\lambda = 400$ nm).
(Rép : 9.2°)

10. Une lumière de longueur d'onde de 600 nm tombe sur une réseau comportant 5000 traits/cm. déterminer l'angle de déviation des spectres du premier, du second et du troisième ordre.
(Rép : 17.5° ; 36.9° ; 64.2°)

11. Un réseau possède 6000 traits/cm
   – Quelle est la longueur d'onde de la lumière déviée de 25° dans le premier ordre ?
   – Quelle est la déviation de cette même lumière dans le second ordre ?
   (Rép : 7×10^{-7} m ; 57.7°)

12. Un faisceau de lumière dont les longueurs d'onde s'étendent de 400 à 700 nm tombe sur une réseau comportant des fentes distantes de 3×10^{-6} m. Déterminer la largeur

du spectre de 2ème ordre.
(Rép : 12.38°)

13. On utilise un réseau de diffraction pour étudier le rayonnement du Soleil. Pour quelle longueur d'onde observe-t-on que l premier ordre est diffracté à 25° de la normale, si le quatrième ordre d'un rayonnement à 656 nm est diffracté à 36° ? Combien de traits par cm le réseau comporte-t-il ?

14. Un rayonnement monochromatique tombe sur une fente de 2.2×10^{-3} mm de largeur. Si l'angle entre les seconds minima de diffraction est de 40°, quelle est la longueur d'onde du rayonnement utilisé ? Quelle est la largeur du maximum central du diagramme de diffraction obtenu sur un écran placé perpendiculairement à la normale du plan de la fente, à une distance de 3.40 m de celle-ci ?

15. Pour mesurer la longueur d'onde de la lumière jaune émise par la vapeur de sodium, on utilise un réseau comportant de 5275 traits par cm. Sur un écran parallèle au réseau et situé à 180.5 cm de celui-ci, on observe deux raies jaunes symétriques de la frange de la frange centrale et distantes de 118. cm. Calculer la longueur d'onde de la lumière correspondante.

16. Un réseau de diffraction possède 5000 traits par cm. Un écran est situé à 2.5 m du réseau.
    (a) Quelle est la déviation angulaire de la lumière jaune-orange du sodium ($\lambda =$ 589 nm), dans le premier ordre de diffraction ?
    (b) Quelle sera la distance entre l'impact sur l'écran de cette lumière jaune-orange dans le second ordre et celui du rayon central non diffracté ?
    (c) Combien d'ordres de diffraction sont théoriquement possibles pour une tel réseau pour cette lumière jaune-orange de ($\lambda = 589$ nm) ? Justifier par calcul votre réponse.
    (d) Si l'ensemble du dispositif était plongé dans l'eau dites qualitativement ce qui serait modifié.

    (Rép : 17.1° ; 1.82 m ; il faut que $\sin\theta = \frac{k\lambda}{a} \leq 1$ donc $k = 3$; v et λ vont diminuer et tous les angles seront plus faibles et il y aura donc un plus grand nombre d'ordre de diffraction.)

17. On réalise une expérience de Young. La longueur d'onde de la lumière rouge est de 780 nm celle de la lumière bleue 520 nm. Pour quelle valeur de n la frange rouge du n^e ordre coïncidera-t-elle avec la frange bleue du $(n+1)^e$ ordre ?
    (Rép : $n = 2$)

18. Calculer la différence entre les angles de déviation des raies spectrales correspondant à 800 nm (rouge) et 400 nm (violet) dans le spectre du premier ordre émis par un réseau comportant 500 traits par cm. Quelle serait la différence entre les mêmes raies

dans le spectre du second ordre ?
(Rép : $1°9'$; $2°18'$)

19. Le maximum du quatrième ordre d'une radiation inconnue coïncide avec le maximum du troisième ordre d'une radiation de longueur d'onde 650 nm. Trouver la longueur d'onde de la radiation inconnue.
(Rép : 487.5 nm)

20. Un réseau de diffraction possède 140 traits par mm.
    (a) Quelle est la déviation angulaire de la lumière rouge d'un rayon laser (670 nm) dans le troisième ordre de diffraction ?
    (b) Quelle sera la distance entre l'impact de cette lumière rouge et celui du rayon central non diffracté sur un écran situé à 4 m de réseau ?
    (c) Combien d'ordres de diffraction sont théoriquement possibles avec un tel réseau pour cette lumière rouge ? Justifier par calcul votre réponse.

    (Rép : $16.35°$; 1.17 mm ; 10)

21. Un écran est éclairé par une lumière verte de longueur d'onde 530 nm traversant deux fentes de 0.1 mm de large séparées par une distance de 0.4 mm. L'écran est situé à 2 m des fentes.
    (a) Précisez au moyen d'un schéma l'image formée sur l'écran. Précisez par un calcul la grandeur qui permet de caractériser cette image.
    (b) Si au lieu de se propager dans l'air entre les fentes et l'écran, la lumière se propageait entièrement dans le plexiglass, quelle serait la modification de l'image perçue sur l'écran ? Les vitesses de la lumière dans l'air et le plexiglass sont liées par $v_{air} = 1.5 \times v_{plexi}$.

    (Rép : $i = 2.7$ mm ; $i = 1.8$ mm)

Chapitre 10

Nature des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont d'une nature très différente des ondes matérielles. Nous allons dans ce chapitre décrire la nature de ces ondes. Les ondes électromagnétiques ont été découvertes en 1886 par Hertz. (Voir figure 10.2).

10.1 Expériences

10.1.1 Emetteur - récepteur

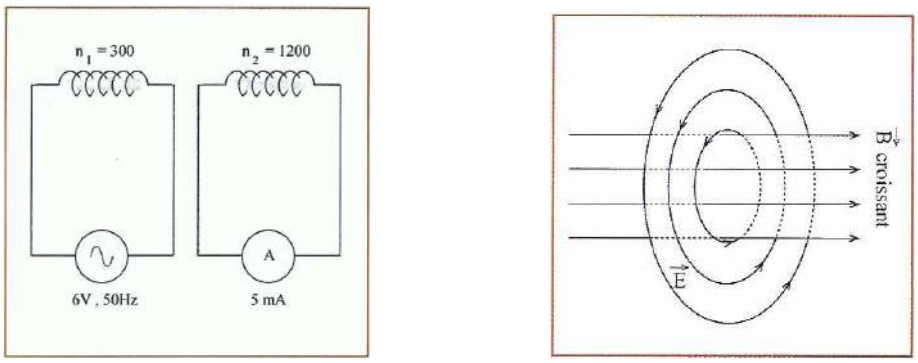


FIGURE 10.1 – (a) Deux bobines côte à côte. Un courant alternatif dans la première bobine engendre un courant alternatif de même fréquence dans la seconde bobine. (b) Là où un champ magnétique varie périodiquement, il apparaît un champ électrique de même fréquence.

On alimente une bobine (qui joue le rôle d'émetteur) en courant alternatif. (Voir figure 10.1 (a)) Une seconde bobine est placée au voisinage de la première de telle façon que les bobines ont leurs axes alignés. Nous constatons que la deuxième bobine est alors parcourue par un courant décelé grâce à un ampèremètre.

Interprétation Nous devons donc en conclure que de l'énergie se propage donc de l'émetteur vers le récepteur. (Voir figure 10.1b) Soumise à une différence de potentiel

variable, la première bobine est parcourue par un courant i d'intensité variable, produisant un champ magnétique variable. La variation du flux magnétique à travers la deuxième bobine a entraîné une courant induit dans le second circuit. La fréquence du courant induit sera égale à la fréquence du courant dans la bobine émettrice. Dans la deuxième bobine, il y a donc des charges électriques en mouvement oscillant ; on doit donc admettre l'existence d'un champ électrique oscillant $\vec{E}$. Rappelons que force et champ électrique sont liés par la relation $\vec{F} = q\vec{E}$. Nous concluons qu'en un endroit où $\vec{B}$ varie périodiquement, un champ $\vec{E}$ apparaît et varie à la même fréquence.

C'est une onde transportant de l'énergie appelée onde électromagnétique. Dans la suite nous utiliserons l'abréviation EM pour onde électromagnétique.

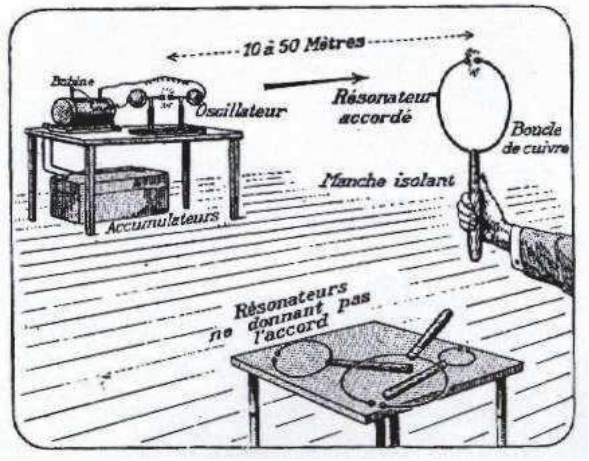


FIGURE 10.2 – Heinrich Rudolf Hertz (né le 22 février 1857 à Hambourg, décédé à Bonn le 1er janvier 1894), était un ingénieur et physicien allemand. Sa contribution essentielle à la physique demeure la vérification expérimentale en 1887 de la théorie de James Maxwell de 1864, selon laquelle la lumière n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique. A l'aide d'un oscillateur (dit oscillateur de Hertz, composé d'un éclateur agissant entre deux sphères creuses en laiton) il mit en évidence l'existence d'autres ondes électromagnétiques, celles-là non visibles. Le 13 novembre 1886, il effectua la première liaison par faisceau hertzien entre un émetteur et un récepteur. Ces résultats ouvraient la voie à la télégraphie sans fil et à la radiophonie. Hertz a également découvert en 1886 la photoélectricité : une plaque de métal étant soumise à une lumière émettra des électrons, dont la quantité dépendra entre autres de l'intensité lumineuse. Son assistant Wilhelm Hallwachs poursuivra les recherches dans ce domaine, découvrant en 1887 l'effet Hallwachs, qui devait jouer un rôle central dans l'hypothèse des quantas de lumière formulée par Albert Einstein en 1905. A droite : l'expérience de Hertz qui permit de mettre en évidence l'existence des ondes électromagnétiques.

10.1.2 Antennes (émetteur-récepteur)

Création d'une onde EM

Le système le plus simple capable d'émettre une EM est peut-être le dipôle oscillant : deux charges opposées vibrent dans un sens puis dans l'autre le long d'une ligne droite. Les lignes du champ électrique qui commencent et se terminent sur les charges, se ferment sur elles-mêmes, quand les deux charges se superposent. (Voir figure 10.3). Des charges en mouvement constituent un courant oscillant dans ce cas ; il se produit donc un champ magnétique oscillant, dont les lignes de forces sont dans des plans perpendiculaires à la

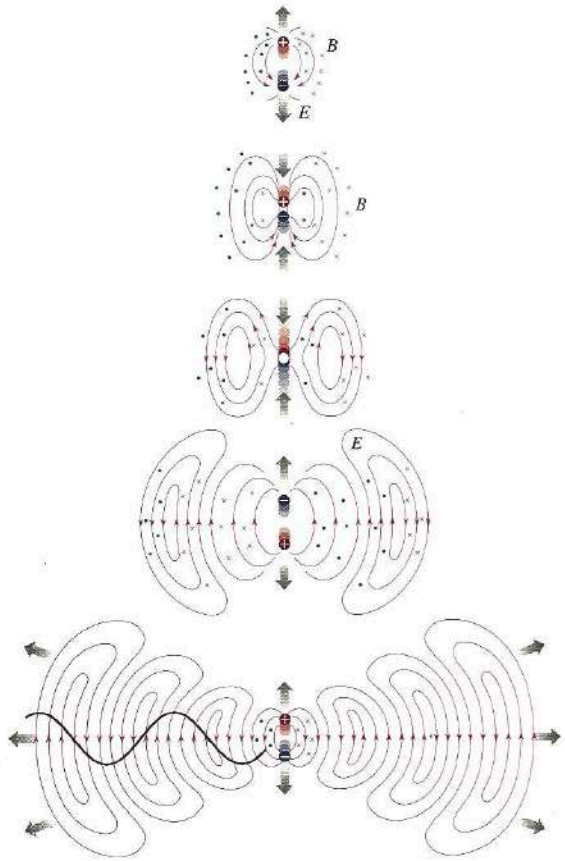


FIGURE 10.3 – Vue en coupe des ondes électromagnétiques, à trois dimensions, émises par un dipôle oscillant. Les courbes fermées sont les lignes de champ électrique. Les points et les croix représentent le champ magnétique normal au plan de la figure (respectivement vers l'avant et vers l'arrière). Les lignes de champ magnétiques sont des cercles ayant l'axe du dipôle comme axe de symétrie (ils sont dans des plans perpendiculaires à la page et entourent le dipôle).

direction du mouvement. Les champs $\vec{B}$ et $\vec{E}$, qui sont en phase, augmentent et diminuent au même rythme, sont perpendiculaires l'un à l'autre et à la direction de propagation. La fréquence du rayonnement est la même que celle de l'oscillation du courant. En résumé, loin du dipôle se développe une onde électromagnétique transversale sortante à trois dimensions. *Nous retiendrons que lorsque des électrons oscillent dans un circuit (= antenne émettrice), une partie de leur énergie est transformée en radiation électromagnétique capable de se propager hors de l'antenne, dans l'espace qui l'entoure. Une des caractéristiques de ces radiations est la fréquence f (nombre d'oscillations par seconde) exprimée en hertz.*

Une fois ces ondes formées, elles se déplacent dans l'espace et même dans le vide avec la même vitesse (300.000 km/s).

Quand une onde de ce type rencontre une antenne métallique, une partie de son énergie est transférée aux électrons du métal qui se mettent à vibrer à la fréquence de l'onde ce qui crée un courant alternatif de même fréquence. Ces ondes EM transportent de l'énergie.

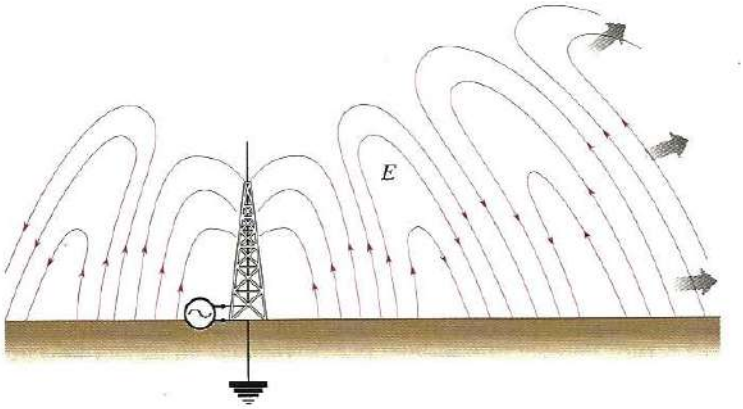


FIGURE 10.4 – Onde de sol générée par une antenne AM : l'onde tend à couvrir les régions habitées par les gens qui désirent la capter avec leurs radios ou leurs téléviseurs. Typiquement, ceci donne à la station de radio une portée entre 40 km et 200 km.

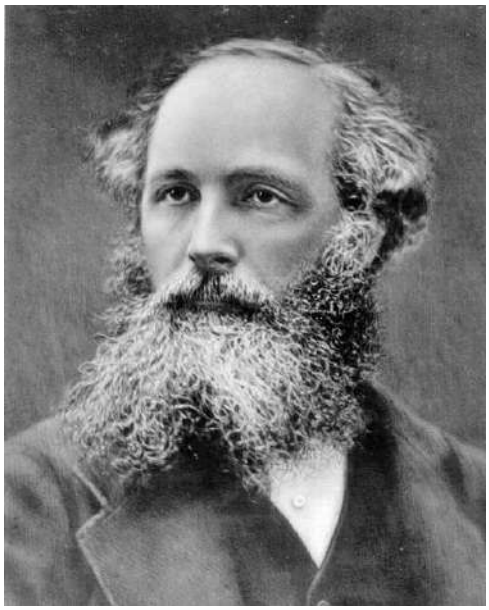


FIGURE 10.5 – James Clerk Maxwell (13 juin 1831 à Édimbourg, en Écosse - 5 novembre 1879) est un physicien et mathématicien écossais. Il est principalement connu pour avoir unifié en un seul ensemble d'équations, les équations de Maxwell, l'électricité, le magnétisme et l'induction, en incluant une importante modification du théorème d'Ampère. Il est également célèbre pour avoir interprété la lumière comme étant un phénomène électromagnétique en s'appuyant sur les travaux de Michael Faraday. Il a notamment démontré que les champs électriques et magnétiques se propagent dans l'espace sous la forme d'une onde et à la vitesse de la lumière. Ces deux découvertes permirent d'importants travaux ultérieurs notamment en relativité restreinte et en mécanique quantique. Il a également développé la distribution de Maxwell, une méthode statistique de description de la théorie cinétique des gaz. Maxwell est considéré par de nombreux physiciens comme le scientifique du XIXe siècle ayant eu le plus d'influence au XXe siècle. Ses contributions à la science sont considérées par certains comme aussi importantes que celles d'Isaac Newton ou d'Albert Einstein. Einstein lui-même décrivait les travaux de Maxwell comme les « plus profonds et fructueux que la physique ait connu depuis le temps de Newton ». Il est également connu pour avoir réalisé la première photographie en vraie couleur en 1861.

10.2 Spéculation de Maxwell

Nous savons qu'un courant produit un champ magnétique $\vec{B}$. De plus, un courant électrique est un déplacement de charges. Or, une charge électrique fixe produit un champ électrique $\vec{E}$ constant mais non uniforme. Si cette charge se déplace elle engendre en champ

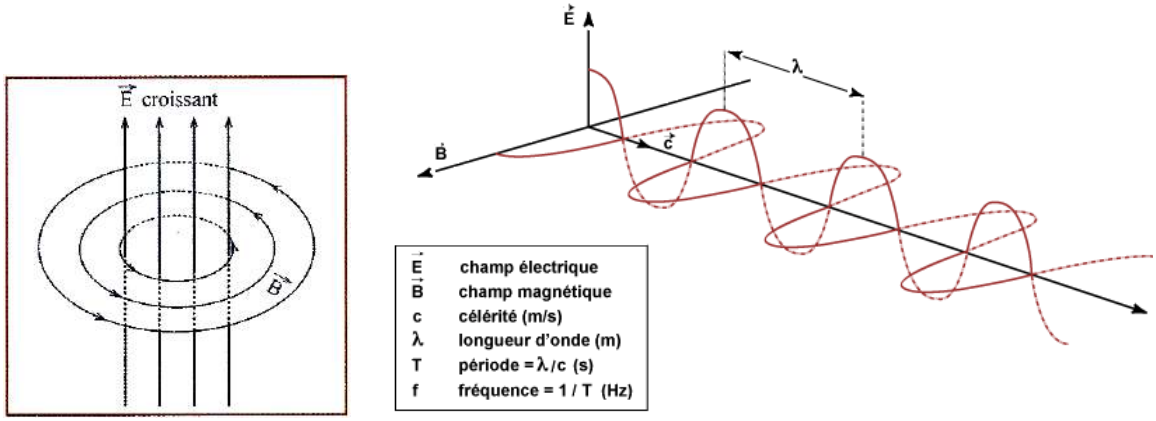


FIGURE 10.6 – (a) Le champ électrique $\vec{E}$ varie et engendre un champ magnétique $\vec{B}$ perpendiculaire qui varie avec la même fréquence. (b) Les champs $\vec{B}$ et $\vec{E}$ génèrent une onde sinusoïdale qui se propage à la vitesse $c = 300000$ km/s.

électrique qui lui aussi se déplace, et donc, en tout point, elle engendre un champ électrique qui varie dans le temps. par un raisonnement purement théorique, Maxwell (Voir figure 10.5) a démontré que si en un endroit un champ électrique $\vec{E}$ varie périodiquement, un champ magnétique $\vec{B}$ apparaît et varie à la même fréquence. Les équations écrites par Maxwell montrent que les champs $\vec{B}$ et $\vec{E}$, engendrés par exemple par un courant alternatif circulant dans un fil rectiligne, ont les propriétés suivantes.

- Ils oscillent sinusoïdalement à la fréquence f du courant ;
- Ils transportent de l'énergie ;
- Ils sont perpendiculaires entre eux et chacun est perpendiculaire à la direction de propagation de l'énergie.

10.3 Le spectre électromagnétique

D'une manière simple notons que l'énergie transportée est fonction de la fréquence de l'onde. *Plus la fréquence est élevée, plus l'onde est énergétique.*

Suivant la fréquence et donc l'énergie de ces ondes, les scientifiques ont classé les ondes EM : on appelle ce classement : le spectre des ondes électromagnétiques. (Voir figure 10.7) Chaque type d'onde EM a un domaine d'applications privilégié (voir vidéo,etc) Dans l'ordre croissant d'énergie, citons

- les ondes hertziennes ou ondes radio. (Découverte : 1886).
- les ondes TV.
- les ondes radar
- les micro-ondes
- l'infrarouge. (Découverte : 1800).
- la lumière visible (rouge au violet)
- l'ultraviolet. (Découverte : 1801).
- les rayons X ; (Découverte : 1895).
- les rayons γ (gamma). (Découverte : 1900).

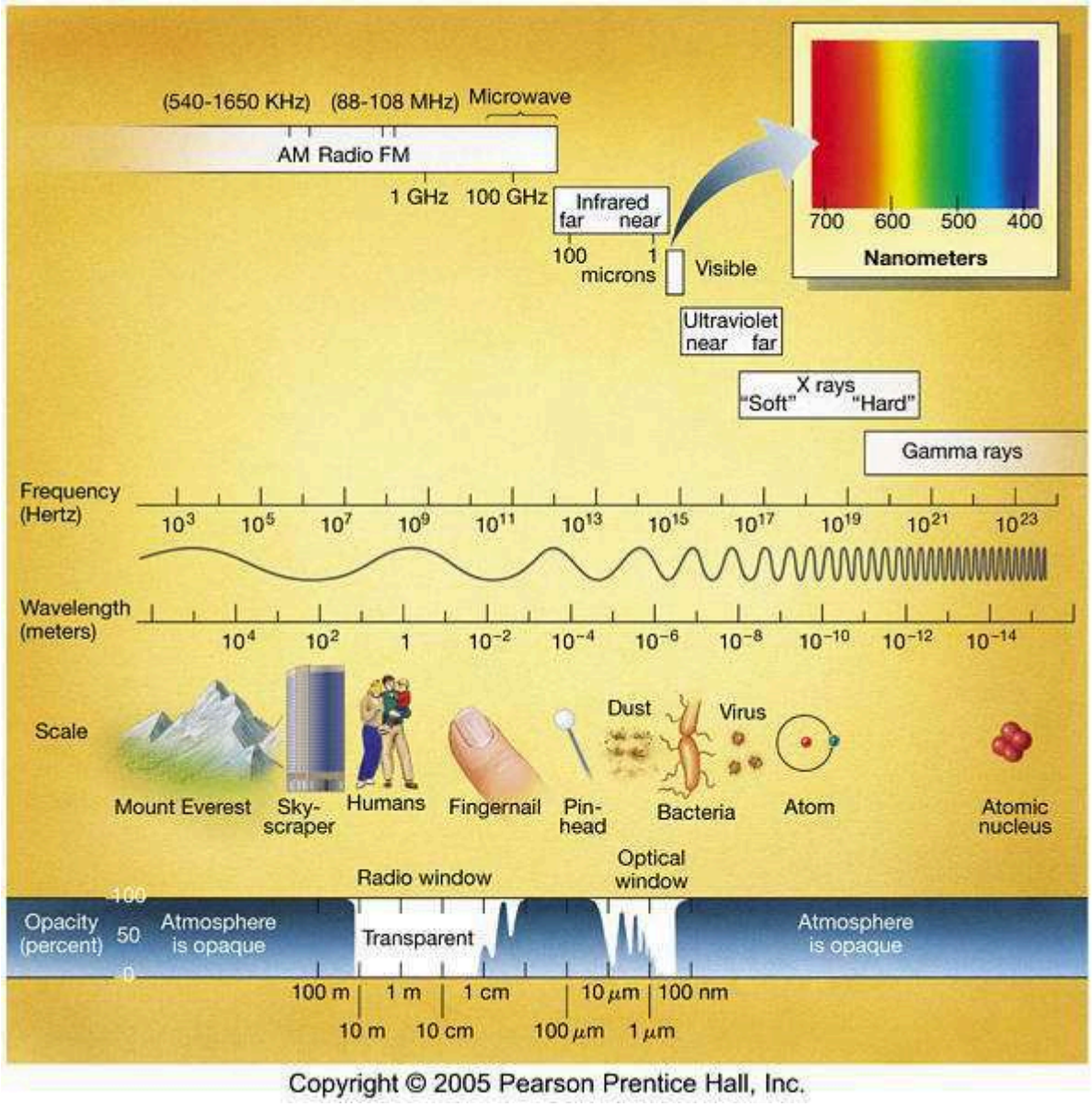


FIGURE 10.7 – Le spectre électromagnétique.

10.4 Applications des ondes EM

10.4.1 Les ondes hertziennes ou ondes radio

Ces ondes sont utilisées pour la transmission radiophonique.[1] On distingue :

1. Les grands hommes peuvent se tromper ! Suite à sa découverte sur les ondes hertziennes, Hertz la publia devant une assemblée d'étudiants. L'un d'entre eux demanda s'il y aurait des applications de ces ondes. Hertz répondit alors qu'il n'y en aurait aucune. Sept ans plus tard (en 1895), le physicien italien Guglielmo Marconi, reprenant les travaux de Hertz, améliora le télégramme en fabriquant le premier télégraphe sans fil, procédé qui se développa à travers le monde et qui intéressa bon nombre de personnes.

- les grandes ondes (600 m $< \lambda <$ 3000 m).
- les ondes courtes (10 m $< \lambda <$ 50 m).
- les ondes moyennes (50 m $< \lambda <$ 60 m).

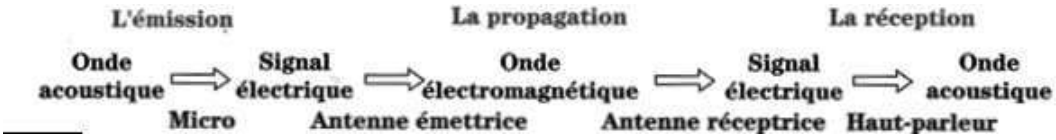


FIGURE 10.8 – Schéma d'une transmission radio.

La transmission radio peut être schématisée comme montré à la figure 10.8 : Le signal acoustique qu'on veut transmettre (parole, musique) produit au départ des différentes stations émettrices doit d'abord être transformé en signal électrique par l'intermédiaire d'un micro. Pour distinguer les différents émetteurs, un signal haute fréquence appelé signal porteur est modulé par le signal à envoyer (signal basse fréquence). Chaque émetteur se distingue par sa fréquence d'émission (ex : 621 kHz pour la première chaîne radio de la RTBF).

La *modulation* consiste à modifier un paramètre du signal porteur, par exemple l'amplitude ou la fréquence. (Voir figure 10.9)

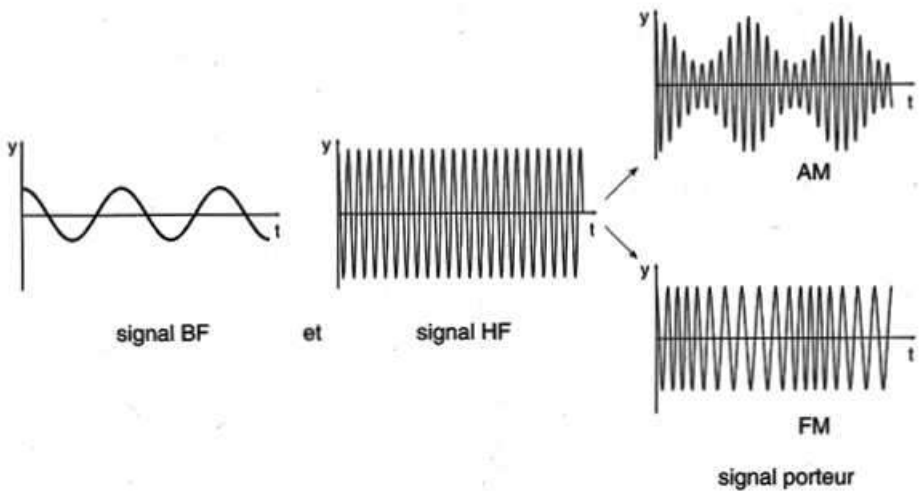


FIGURE 10.9 – Modulation : un signal BF porteur de l'information à transmettre est superposé à un signal HF de fréquence et d'amplitude constante. Deux résultats possibles : AM = l'amplitude du signal HF est modulé par le signal BF. FM = la fréquence du signal HF est modulé par le signal BF.

- En *modulation d'amplitude* ou AM c'est l'amplitude du signal porteur qui varie.
  - Avantage : La portée est très grande. Avec un seul émetteur, on peut couvrir un immense territoire.
  - Défaut des ondes AM : elles recueillent le bruit émanant de presque tout : éclairs, moteurs électriques, allumage de voiture, etc. La qualité de la réception est donc parfois de piètre qualité.
- En *modulation de fréquence* ou FM, c'est la fréquence du signal qui varie.
  - Avantage : peu de bruit de fond. Très bonne qualité de la réception.

– Défaut : portée relativement faible, d'où la nécessité d'avoir plusieurs émetteurs, ce qui pose à son tour d'autres problèmes (Lesquelles ?).

La propagation des ondes électromagnétiques dépend de leur longueur d'onde (voir : diffraction des ondes). Les grandes ondes (France Inter, Europe 1, RTL,etc) sont facilement diffractées par le relief des immeubles. Elles suivent la courbure de la terre et sont reçues à grande distance. Elles peuvent être reçues au fond d'une vallée car leur longueur d'onde est bien supérieure aux obstacles. (Voir la diffraction des ondes page 122).

Par contre, les ondes courtes (ex : bande FM de 88 MHz à 108 MHz) se propagent en ligne droite. Ces ondes ne suivent pas la courbure de la terre et leur portée est limitée. Elles sont difficilement reçues au fond des vallées puisque des obstacles, comme des collines de 100 m de haut, sont beaucoup plus grands que leur longueur d'onde. Il n'y a alors pas de diffraction mais la propagation reste rectiligne.

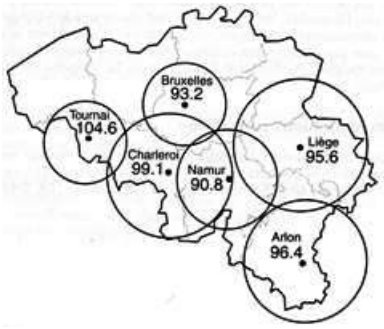


FIGURE 10.10 – Réception des ondes FM. Afin de pouvoir entendre une même station émettrice, il faudra donc un réseau d'antennes qui amplifient et qui ré-émettent le signal de départ à des fréquences différentes afin d'éviter des interférences. La carte mentionne la portée des émetteurs et la fréquence en mégahertz

FIGURE 10.11 – La radioastronomie est une branche de l'astronomie traitant de l'observation du ciel dans le domaine des ondes radio. C'est une science relativement jeune qui a fait ses débuts dans les années 1930. Afin d'obtenir suffisamment de signal, certaines antennes sont gigantesques, par exemple le radiotélescope d'Arecibo a un diamètre de 305 mètres. Pour obtenir une résolution fine, on utilise des réseaux d'antennes et même des Very Large Array. La photo représente le very Large Array près de Socorro (Nouveau-Mexique) aux États-unis.

10.4.2 Les ondes TV

Sûrement observées lors de la sélection des stations TV sur le téléviseur, on a :
– VHF (Very high frequencies)
– UHF (ultra high frequencies)

Le principe est le même que pour les ondes radio mais en plus ici il faut transporter les informations relatives à l'image (10 millions d'informations par seconde) et la fréquence des ondes sera donc plus élevée.

FIGURE 10.12 – Les écrans de TV et d'ordinateur émettent aussi des EM.

10.4.3 Les ondes radar

Le radar est un système qui utilise les ondes radio pour détecter et déterminer la distance et/ou la vitesse d'objets tels que les avions, bateaux, ou encore la pluie. Un émetteur envoie des ondes radio, qui sont réfléchies par la cible et détectées par un récepteur, souvent situé au même endroit que l'émetteur. La position est estimée grâce au temps de retour du signal et la vitesse est mesurée à partir du changement de fréquence du signal par effet Doppler.

Le radar est utilisé dans de nombreux contextes : en météorologie, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance du trafic routier, par les militaires, en astronautique, etc. Le mot lui-même est un néologisme provenant de l'acronyme anglais : RAdio Detection And Ranging, que l'on peut traduire par « détection et estimation de la distance par ondes radio », « détection et télémétrie radio », ou plus simplement « radiorepérage ».

10.4.4 Les micro-ondes

Dans un four à micro ondes, ces vibrations vont provoquer l'échauffement et donc une augmentation de la température des aliments contenant de l'eau. (Voir figure 10.15). Ces ondes sont aussi utilisées pour la transmission téléphonique (GSM). Les fréquences utilisées sont à l'origine de la polémique sur l'usage des GSM ainsi que des antennes. On retiendra que faute d'informations précises et vérifiées, il convient d'être prudent et de faire un usage modéré de son GSM.

FIGURE 10.13 – Cette antenne radar longue portée, connue sous le nom ALTAIR, est utilisée pour détecter et pister les objets spatiaux en conjonction avec le système anti-missiles balistiques sur le site Ronald Reagan Test Site localisé principalement sur l'atoll Kwajalein des Îles Marshall

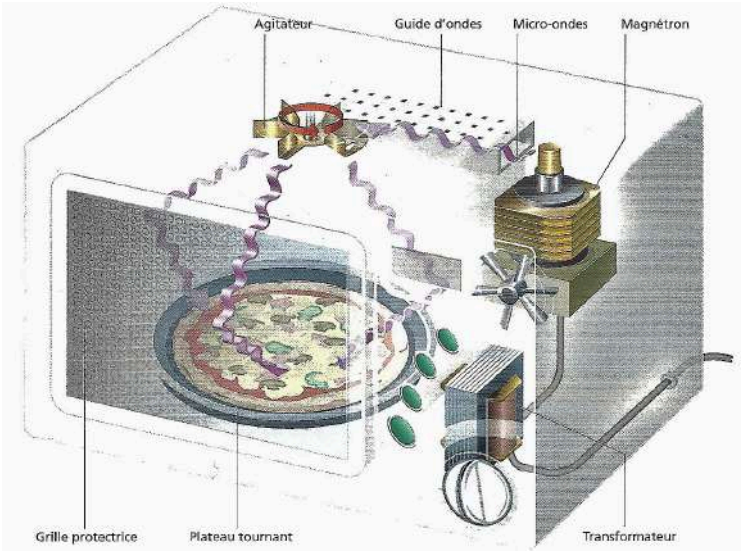


FIGURE 10.14 – Vue d'ensemble du four à micro-ondes. Un transformateur fournit la puissance nécessaire au magnétron. Le magnétron, rafraîchi par un ventilateur, émet un faisceau de micro-ondes. Ces ondes sont acheminées par un guide d'ondes vers l'agitateur en rotation qui les répartit dans l'enceinte du four.

FIGURE 10.15 – Les micro-ondes sont notamment utilisées pour réchauffer les plats.

10.4.5 L'infrarouge

Ce sont des ondes émises essentiellement par les corps chauds c'est à dire les corps dont les molécules sont en agitation thermique.(radiateur, plaque de cuisson, le corps humain, Soleil,etc).Ces rayons sont capables d'impressionner des plaques photographiques spéciales permettant ainsi de faire des photos ou des films dans l'obscurité. (Voir figure ref). Les

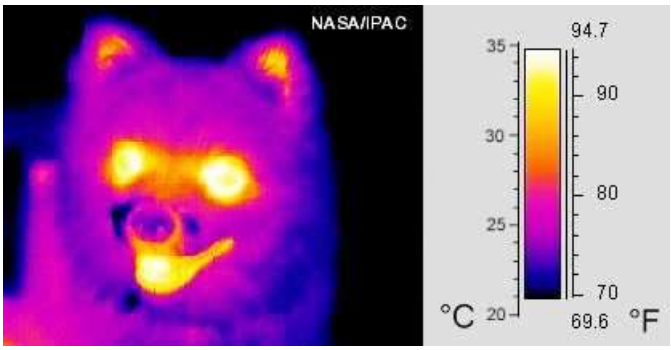


FIGURE 10.16 – Image infrarouge de longueur d'onde moyenne d'un petit chien en fausse couleur.

corps qui absorbent les IR voit leur température augmenter. On les utilise donc pour le chauffage, la cuisson, séchage de peinture mais aussi pour le réchauffement d'un muscle (thermothérapie). En outre, on utilise aussi les dans des prospections géologiques, l'étude des déperditions calorifiques (thermographie), les télécommandes et communications entre un ordinateur et ses périphériques, vision nocturne, guidage, détecteur de missile, détecteur d'intrusion, spectroscopie, détection des faux billets, gravure et découpage (laser infrarouge).

Lecture : l'effet de serre Lorsque la lumière solaire atteint le sol, elle y est absorbée partiellement ce qui provoque un échauffement. Comme tout objet chaud, le sol devient ainsi émetteur de rayonnement infra-rouge. Cette émission IR tend à limiter l'élévation de la température du sol et, la nuit, cette même émission IR fera perdre au sol une grande partie de la chaleur causant parfois de célèbres gelées au ras du sol.

L'effet de serre est un processus naturel qui, pour une absorption donnée d'énergie électromagnétique, provenant du Soleil (dans le cas des corps du système solaire) ou d'autres étoiles (dans le cas général), confère au corps qui reçoit cette énergie une température de surface nettement supérieure à une situation « sans effet de serre ». On le retrouve sur différents objets célestes dans le système solaire, notamment sur Vénus.

Une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère participe au réchauffement climatique.

Lorsque le rayonnement solaire atteint l'atmosphère terrestre, une partie (environ 30 %) est directement réfléchie, c'est-à-dire renvoyée vers l'espace, par l'air, les nuages blancs et la surface claire de la Terre, en particulier les régions blanches et glacées comme l'Arctique et l'Antarctique, c'est l'albédo qui n'est pas représenté sur le schéma. Les rayons incidents qui n'ont pas été réfléchis vers l'espace sont absorbés par l'atmosphère (20,7 %) et la surface terrestre (51 %).

Cette dernière partie du rayonnement absorbée par la surface du sol lui apporte de la chaleur, autrement dit de l'énergie, qu'elle restitue à son tour, le jour comme la nuit, en direction de l'atmosphère sous forme de rayons infrarouges lointains (dans la plage

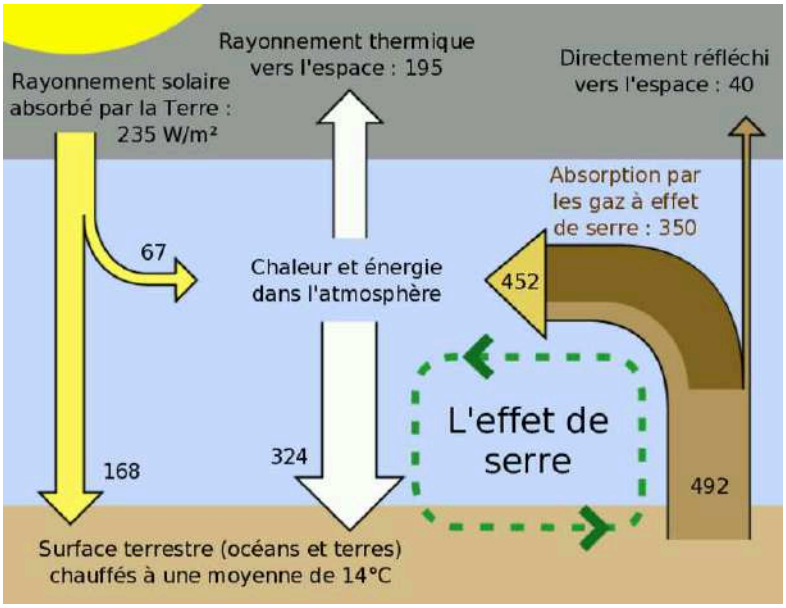


FIGURE 10.17 – Une représentation schématique des échanges d'énergie entre l'espace, l'atmosphère terrestre, et la surface de la Terre.

8-13 mm principalement). C'est le « rayonnement du corps noir ». Ce rayonnement est alors absorbé en partie par les gaz à effet de serre, ce qui réchauffe l'atmosphère. Puis dans un troisième temps, cette chaleur est réémise dans toutes les directions ; une partie s'échappe vers l'espace, mais une autre partie retourne vers la Terre et constitue un apport supplémentaire de chaleur à la surface.

Sans effet de serre, et à albédo constant, la température moyenne sur Terre chuterait à -18 °C. Mais à cette température la glace s'étendrait sur le globe, l'albédo terrestre augmenterait, et la température se stabiliserait vraisemblablement en dessous de -50 °C.

Les serres de jardin exploitent le fait que le verre des vitres est transparent à la lumière visible mais absorbe les rayons IR. De la sorte, les rayons IR émis par le sol sont captés par les vitres. Le verre les absorbe et les ré-émet dans toutes les directions. Une partie de cette émission par le verre est dirigée vers le bas et contribue à maintenir chaud le sol de la serre. Ceci s'appelle l'effet de serre.

10.4.6 La lumière visible (rouge au violet)

Voir page 183 " La dispersion de la lumière ".

10.4.7 L'ultraviolet UV

Près de 5 % de l'énergie du Soleil est émise sous forme de rayonnement UV. Ces rayons UV sont classés dans trois catégories en fonction de leur longueur d'onde : les UVA, UVB et UVC. Toutefois, en raison de l'absorption des UV par la couche d'ozone de l'atmosphère, 99 % de la lumière UV qui atteint la surface de la Terre appartient à la gamme des UVA.

Les UV traversent l'atmosphère même par temps froid ou nuageux (ils n'ont rien à voir avec la sensation de chaleur procurée par le Soleil, qui est due aux infrarouges). Ils

sont plus nombreux entre 12h et 16h et à haute altitude (car en traversant une plus petite distance dans l'atmosphère, ils ont moins de chances d'être interceptés par des molécules d'ozone). [2] Les UV sont réfléchis par l'eau (5 % des UV réfléchis), le sable (20 % des UV réfléchis), l'herbe (5 % des UV réfléchis) et surtout la neige (85 % des UV réfléchis).

Le trou dans la couche d'ozone est potentiellement dangereux en raison de la nocivité importante des ultraviolets. Toutefois, seul l'Antarctique est touché par ce trou, donc il ne peut avoir un effet que sur un très petit nombre d'être vivants tels que les manchots.

Il faut aussi savoir que les 80 % de UV traversent les nuages mais ils pénètrent aussi dans l'eau (à un mètre de profondeur). Par contre, le verre absorbe une grande partie des UV. On perd donc son temps à essayer de bronzer derrière une fenêtre.

Suivant leur énergie, on distingue donc les UVA, UVB, UVC.

- Les UVA et B exercent une action physiologique sur l'épiderme car ils produisent au contact de la peau de la vitamines D, mais ils ont aussi un effet néfaste sur le corps. Les UVA traversent le derme et accélèrent le vieillissement de la peau en provoquant des rides. Ils sont responsables des cancers de la peau
- Les UVB atteignent l'épiderme et sont responsables du bronzage et des coups de Soleil. En effet, à la base de l'épiderme, on a des cellules, " les mélanocytes " dont le rôle est de produire des grains : " la mélanine ". Celle-ci est produite en grande quantité sous l'action du Soleil. Ils migrent alors vers la surface de la peau pour la protéger en absorbant les UVB et de ce fait il colore la peau. En fait, la mélanine contient des grains noirs et rouges. Une peau mate contient plus de noirs que de rouges. Les noirs migrent vers la surface de la peau pour la protéger et la colorer. Une peau claire contient plus de rouges que de noirs. Les rouges ne remontent pas en surface, protègent moins bien et colorent donc moins la peau. Attention, toutes les peaux doivent être protégées car si la mélanine absorbe les UVB, ils laissent passer les UVA d'où l'emploi de crèmes solaires pour s'en protéger.
- Les UVC (comme les X et les γ) sont arrêtés par la couche d'ozone située à une trentaine de kilomètres d'altitude. Ces rayons sont extrêmement dangereux.

Certains UV ont une action germicide c'est à dire qu'ils peuvent tuer les micro-organismes. Cette propriété est utilisée dans la stérilisation. (Voir figure 10.18b)

Lecture : Lorsque vos "lunettes de Soleil" n'en sont pas La pupille permet d'adapter à la luminosité extérieure la quantité de lumière que votre oeil laisse passer. En cas de grande luminosité, la pupille diminue de taille, évitant l'éblouissement et améliorant la netteté de la vision. Lorsque l'éblouissement est trop conséquent, la pupille ne suffit plus à protéger les yeux, c'est pour cela que l'on porte des lunettes de soleil. Cependant des lunettes de soleil de mauvaises qualités peuvent avoir un effet dramatique : si vos lunettes de Soleil ne sont pas de véritables lunettes prévues pour protéger vos yeux des UV solaires, mais seulement des verres teintés, porter ces lunettes peut être encore plus dangereux que de ne rien porter. En effet, des verres teintés qui diminuent la luminosité dans le visible amènent la pupille à se dilater, laissant ainsi passer plus de lumière et en particulier plus de rayonnement ultraviolet dangereux pour la rétine, etc. Par conséquent si vos verres teintés diminuent la luminosité dans le visible mais ne sont pas conçus pour

2. Dans la majorité de l'Europe, le soleil de midi, le plus agressif, est en été vers 14h, c'est pourquoi il est déconseillé de s'exposer entre 12h et 16h, tout particulièrement à proximité de l'eau ou de la neige qui réverbèrent une partie des UV ou en montagne où les taux d'UV sont plus importants.

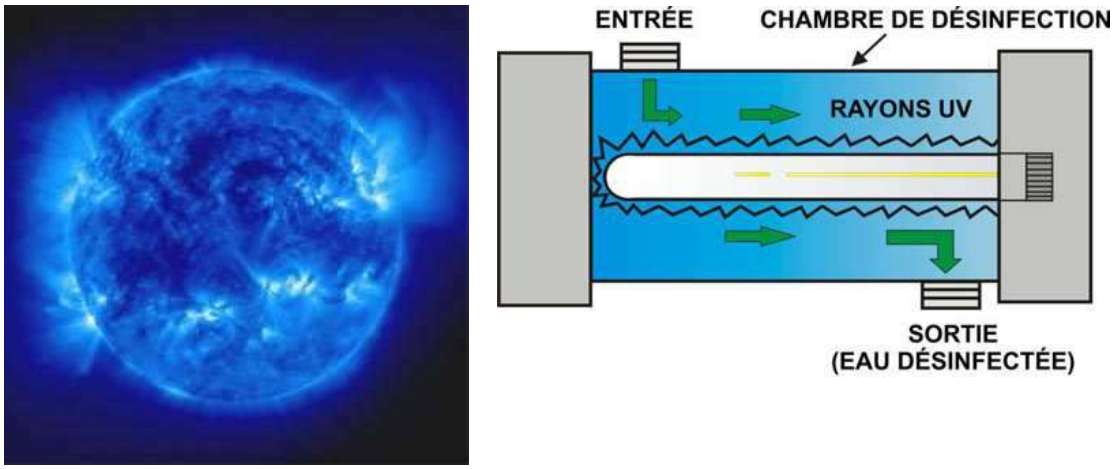


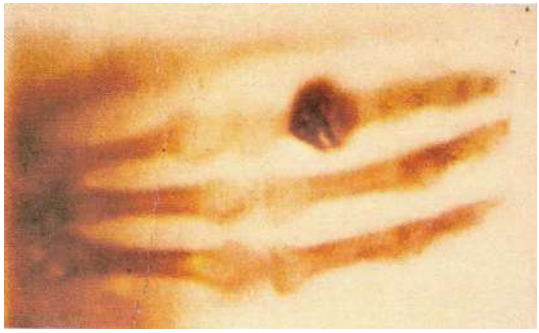
FIGURE 10.18 – (a) Le Soleil en ultraviolet avec l'instrument EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope). Ici, à la longueur d'onde 171 angströms, la matière brillante est à 1 million de degrés ! crédits : ESA/NASA. (b) Schéma élémentaire d'une unité de traitement UV avec lampe

FIGURE 10.19 – Attention aux lunettes de Soleil de mauvaise qualité.

protéger efficacement des UV, votre rétine reçoit encore plus d'ultraviolets lorsque vous les portez que si vous ne les mettez pas ! !

10.4.8 Les rayons X

Découverts par Röntgen en 1895. Les X peuvent traverser des substances et impressionner des plaques photo (radiographie). L'absorption des X par une matière est d'autant plus grande que l'épaisseur traversée est grande mais l'absorption dépend aussi de la nature du milieu traversé. Ainsi les X sont arrêtés par du plomb (tablier en plomb utilisé en médecine nucléaire). De même, les os humains sont plus absorbants que les tissus qui les entourent. Donc il en résulte sur une plaque photo, une image des os à l'intérieur du corps Un scanner est un appareil à rayons X mais dont l'image est construite en faisant tourner le source de rayons X d'un angle de 360° autour de l'organe à étudier. En radiothérapie, les X sont utilisés en médecine pour détruire les cellules cancéreuses. Dans les expertises, l'analyse des produits utilisés dans la peinture permet de déceler les faux. Les X sont très utilisés pour l'analyse des tableaux car ils révèlent tout ce qu'une toile renferme entre autre, le style et la technique d'un artiste ainsi que toutes les modifications apportées à l'oeuvre originale.



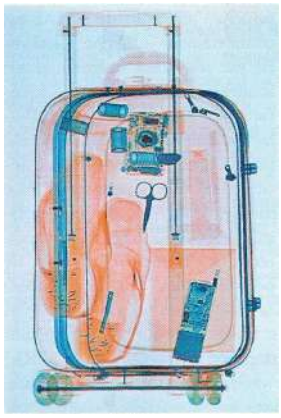


FIGURE 10.20 – (a) La première radiographie a été prise par Röntgen en 1895. Il soumit la main de sa femme aux rayons X qu'il venait de découvrir. (b) Contrôle du contenu d'une valise par un détecteur à rayons X

FIGURE 10.21 – Wilhelm Conrad Röntgen (27 mars 1845 à Lennep (aujourd'hui un quartier de Remscheid), Allemagne - 10 février 1923 à Munich) est un physicien allemand. Il a découvert les rayons X, ce qui lui a valu de recevoir le premier prix Nobel de physique en 1901. Il a reçu la médaille Rumford en 1896.

10.4.9 Les rayons γ (gamma)

Rayon gamma est le nom donné au rayonnement électromagnétique produit par la désintégration des noyaux atomiques ou par des phénomènes subatomiques comme l'annihilation d'une paire électron-positron. Ils ont une énergie qui varie dans une plage allant de la centaine à plusieurs centaines de keV. La découverte des rayons gamma est due à Paul Villard, chimiste français (1860-1934).

Les rayons gamma sont plus pénétrants que les rayonnements alpha et les bêta, mais sont moins ionisants. Ils sont de même nature que les rayons X mais sont d'origine différente. Le blindage contre les rayons gamma requiert des grandes quantités de matière. Par exemple un blindage qui réduit de 50 % l'intensité de rayons gamma de 1 MeV nécessite 1 cm de plomb, 6 cm de béton ou 9 cm de terre.

Les rayons gamma provenant de retombées radioactives seraient probablement le plus grand danger dans le cas d'une guerre nucléaire. Si les rayons gamma sont moins ionisants que les rayons alpha ou bêta, ils demandent des épaisseurs de blindage beaucoup plus importantes pour s'en protéger (de l'ordre de quelques mètres d'épaisseur de béton armé).

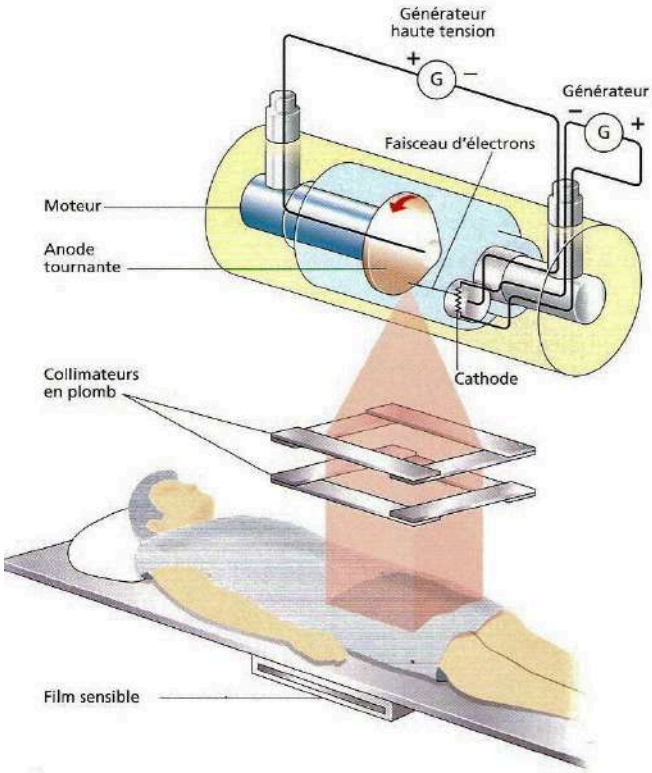
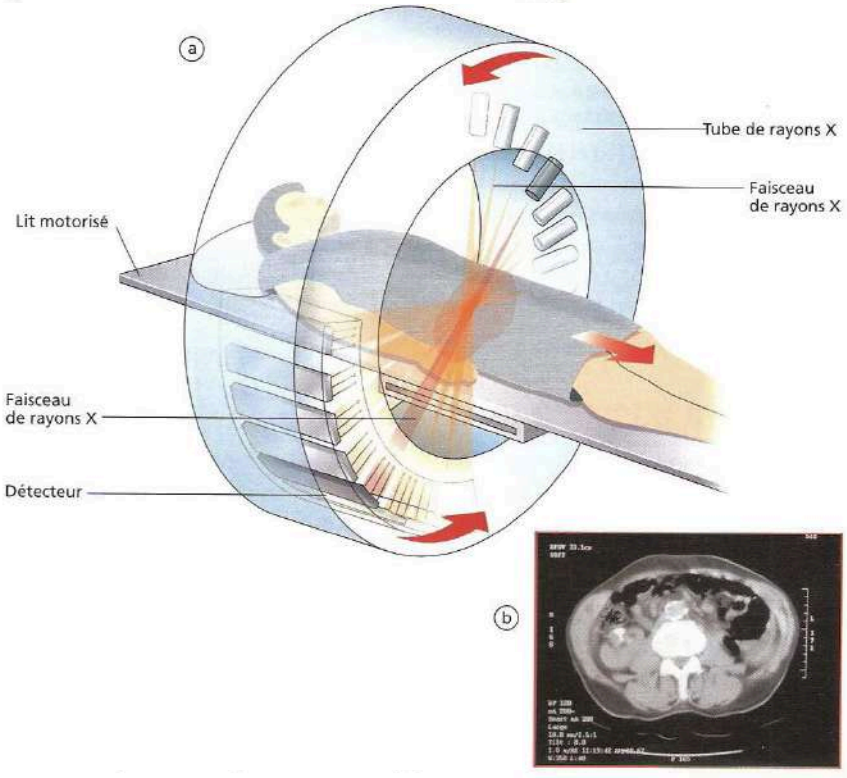


FIGURE 10.22 – (a) Dans un appareil de radiographie, le tube à rayons X permet, à l'aide de collimateurs en plomb, d'irradier une zone précise. Cette technique ne fournit pas d'information sur la profondeur des zones observées.



(b) Obtention d'une coupe -b- par un scanner à rayons X. Le tube à rayons X et le détecteur tournent autour du patient pour enregistrer une coupe donnée. Le lit se déplace progressivement pour permettre aux rayons X de balayer la zone d'intérêt -a-.

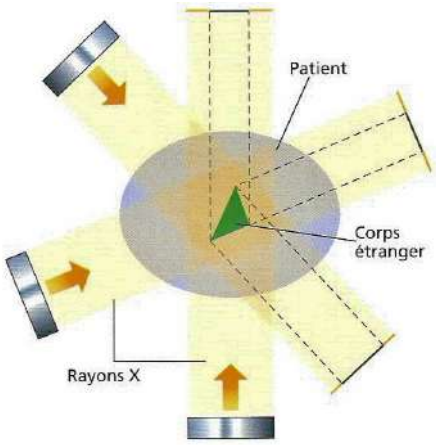


FIGURE 10.23 – Principe de la création d'une coupe par scanner à rayons X. Plusieurs projections sont requises pour avoir accès à la forme exacte et à la position précise de l'objet situé dans le corps du patient. Plus l'objet est complexe et plus le nombre de vues nécessaire est élevé.

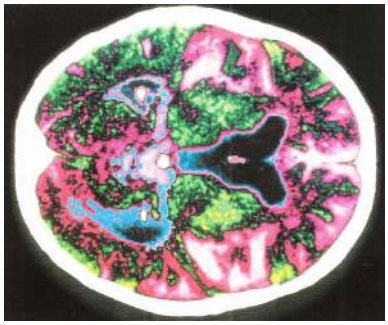


FIGURE 10.24 – (a) Exemple de reconstruction tridimensionnelle, après le traitement par le logiciel de reconstruction des différentes coupes du scanner.(b) Coupe du cerveau d'une personne atteinte par la maladie d'Alzheimer, réalisé par un scanner à rayons X. Les couleurs repèrent les tissus sains et les zones lésées par la maladie.

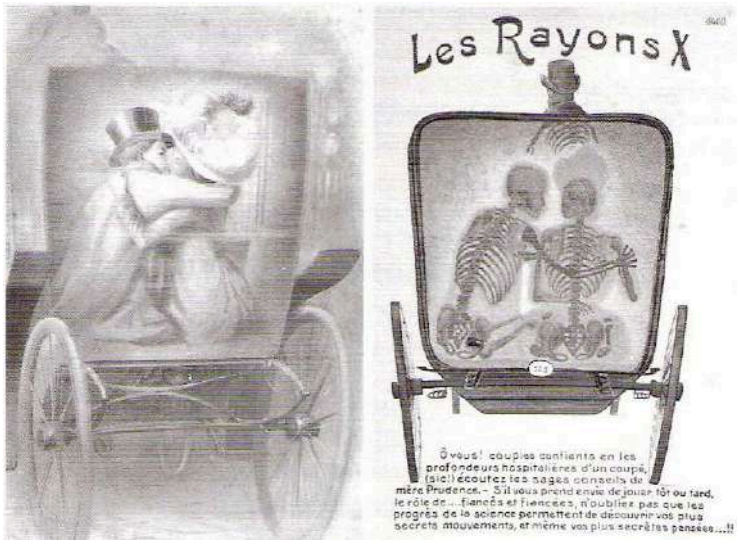


FIGURE 10.25 – L'aspect magique des rayons X frappe le grand public à la fin du XIXème siècle, comme le montre cette reproduction de cartes postales de l'époque.

Ils peuvent produire des dégâts similaires à ceux produits par les rayons X et les autres rayonnements ionisants, tels que brûlures, cancers et mutations génétiques.

Ces rayons extrêmement énergétiques et donc dangereux seront analysés dans la partie "Nucléaire " du cours de physique moderne. A noter que malgré leur dangerosité, les rayons γ trouvent des applications dans des domaines aussi variés que le contrôle de soudure en milieu industrielle, ou en archéologie. (Voir figure 10.26).

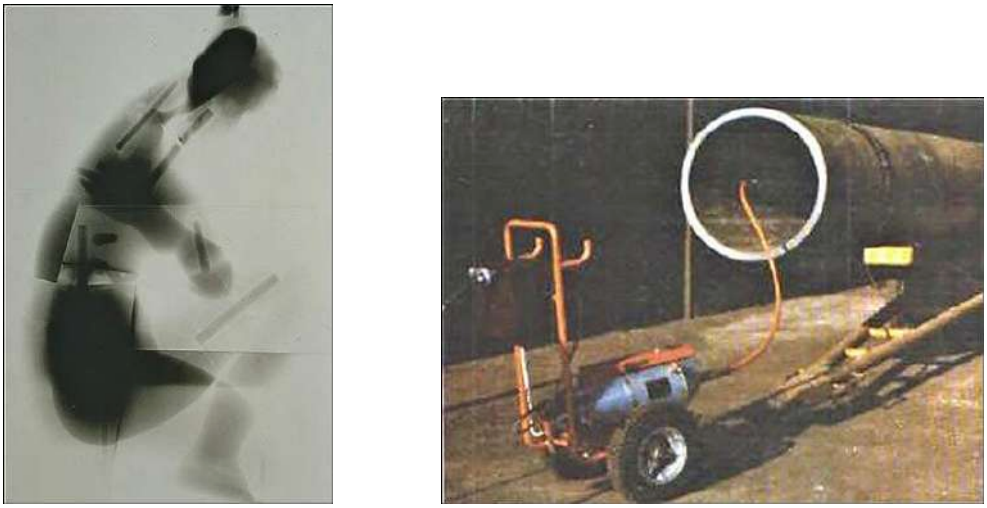


FIGURE 10.26 – (a) Gammagraphie de la statue d'Aphrodite. La gammagraphie de cette statut d'Aphrodite du musée du Louvre a permis de mettre en évidence les consolidations antérieures de la statue de marbre, et de situer les inserts métalliques et les cavités. (b) Gammagraphie industrielle. Opération de contrôle de soudure afin de détecter un éventuel défaut.

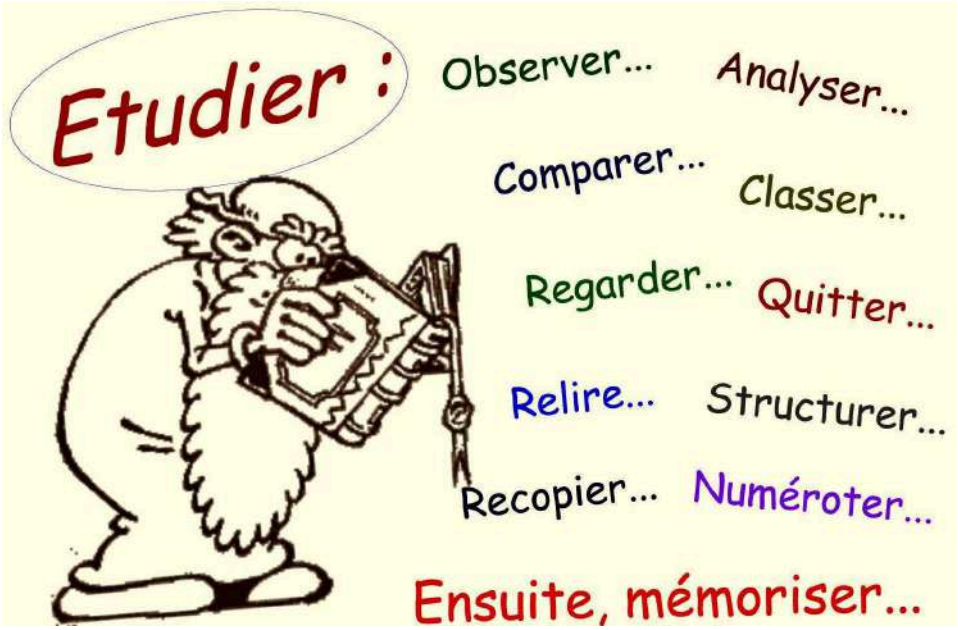
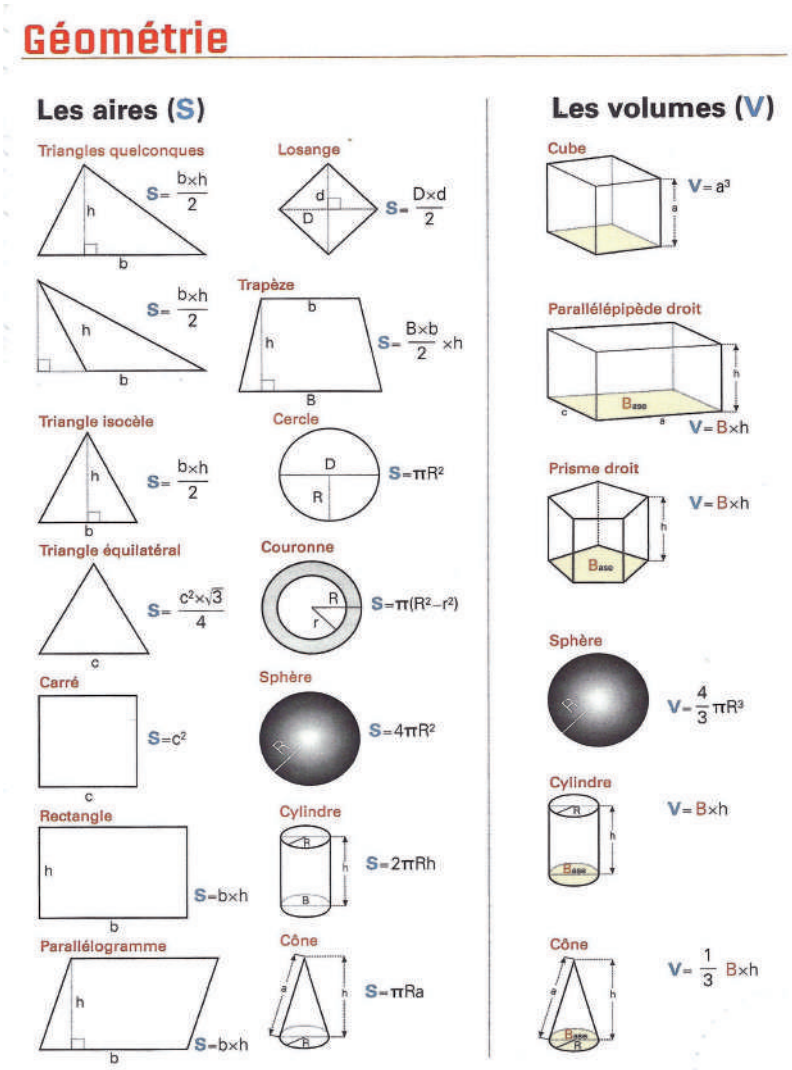


FIGURE 10.27 – C'est triste, c'est fini. Il n'y a plus qu'à étudier. Courage

Chapitre 11

Annexes



Formules mathématiques*

Géométrie

Triangle de base b et de hauteur h	Aire $= \frac{1}{2}bh$	
Cercle de rayon r	Circonférence $= 2\pi r$	Aire $= \pi r^2$
Sphère de rayon r	Aire de la surface $= 4\pi r^2$	Volume $= \frac{4}{3}\pi r^3$
Cylindre de rayon r et de hauteur h	Aire de la surface courbe $= 2\pi rh$	Volume $= \pi r^2 h$

Algèbre

Si $ax^2 + bx + c = 0$, alors $\quad x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$

Si $x = a^y$, alors $y = \log_a x$; $\quad \log(AB) = \log A + \log B$

Produits vectoriels

Produit scalaire : $\vec{\mathbf{A}} \cdot \vec{\mathbf{B}} = AB\cos\theta$

$$= A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

Produit vectoriel :

$$\vec{\mathbf{A}} \times \vec{\mathbf{B}} = (A_x\vec{\mathbf{i}} + A_y\vec{\mathbf{j}} + A_z\vec{\mathbf{k}}) \times (B_x\vec{\mathbf{i}} + B_y\vec{\mathbf{j}} + B_z\vec{\mathbf{k}})$$

$$= (A_y B_z - A_z B_y)\vec{\mathbf{i}} + (A_z B_x - A_x B_z)\vec{\mathbf{j}} + (A_x B_y - A_y B_x)\vec{\mathbf{k}}$$

Trigonométrie

$\sin(90° - \theta) = \cos\theta$; $\quad \cos(90° - \theta) = \sin\theta$

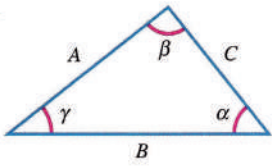
$\sin(-\theta) = -\sin\theta$; $\quad \cos(-\theta) = \cos\theta$

$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$; $\quad \sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$

$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \cos A \sin B$

$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \sin A \sin B$

$$\sin A \pm \sin B = 2 \sin\left(\frac{A \pm B}{2}\right)\cos\left(\frac{A \mp B}{2}\right)$$



Loi des cosinus $\quad C^2 = A^2 + B^2 - 2AB\cos\gamma$

Loi des sinus $\quad \dfrac{\sin\alpha}{A} = \dfrac{\sin\beta}{B} = \dfrac{\sin\gamma}{C}$

Approximations du développement en série (pour $x \ll 1$)

$$\left.\begin{array}{ll} (1+x)^n \approx 1 + nx & \sin x \approx x - \dfrac{x^3}{3!} \\ e^x \approx 1 + x & \cos x \approx 1 - \dfrac{x^2}{2!} \\ \ln(1 \pm x) \approx \pm x & \tan x \approx x - \dfrac{x^3}{3} \end{array}\right] \quad (x \text{ en radians})$$

Constantes physiques

Nom	Symbole	Valeur approchée	Valeur précise*
Charge élémentaire	e	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C	$1{,}602\ 177\ 33(49) \times 10^{-19}$ C
Constante de Boltzmann	$k = R/N_A$	$1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K	$1{,}380\ 658(12) \times 10^{-23}$ J/K
Constante de gravitation	G	$6{,}672 \times 10^{-11}$ N·m²/kg²	$6{,}672\ 59(85) \times 10^{-11}$ N·m²/kg²
Constante de la loi de Coulomb	$k\ (= 1/4\pi\varepsilon_0)$	$9{,}00 \times 10^{9}$ N·m²/C²	$8{,}987\ 551\ 8 \times 10^{9}$ N·m²/C²
Constante de Planck	h	$6{,}626 \times 10^{-34}$ J·s	$6{,}626\ 075\ 5(40) \times 10^{-34}$ J·s
Constante des gaz parfaits	R	8,314 J/(K·mol)	8,314 510(70) J/(K·mol)
Masse de l'électron	m_e	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg	$9{,}109\ 389\ 7(54) \times 10^{-31}$ kg
Masse du proton	m_p	$1{,}672 \times 10^{-27}$ kg	$1{,}672\ 623\ 1(10) \times 10^{-27}$ kg
Nombre d'Avogadro	N_A	$6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1}	$6{,}022\ 136\ 7(36) \times 10^{23}$ mol^{-1}
Perméabilité du vide	μ_0	–	$4\pi \times 10^{-7}$ N/A² (exacte)
Permittivité du vide	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8{,}854 \times 10^{-12}$ C²/(N·m²)	$8{,}854\ 187\ 818 \times 10^{-12}$ C²/(N·m²)
Unité de masse atomique	u	$1{,}661 \times 10^{-27}$ kg	$1{,}660\ 540\ 2(10) \times 10^{-27}$ kg
Vitesse de la lumière dans le vide	c	$3{,}00 \times 10^{8}$ m/s	$2{,}997\ 924\ 58 \times 10^{8}$ m/s (exacte)

* E. Richard Cohen et B. N. Taylor, *Reviews of Modern Physics*, vol. 59, n° 4, octobre 1987, p. 1121. Les nombres entre parenthèses indiquent l'incertitude sur les deux derniers chiffres.

Abréviations des unités courantes

Ampère	A	Kelvin	K
Année	a	Kilocalorie	kcal (Cal)
Ångström	Å	Kilogramme	kg
Atmosphère	atm	Livre	lb
British thermal unit	Btu	Mètre	m
Candela	cd	Minute	min
Coulomb	C	Mole	mol
Degré Celsius	°C	Newton	N
Degré Fahrenheit	°F	Ohm	Ω
Électronvolt	eV	Pascal	Pa
Farad	F	Pied	pi
Gauss	G	Pouce	po
Gramme	g	Seconde	s
Henry	H	Tesla	T
Heure	h	Unité de masse atomique	u
Horse-power	hp	Volt	V
Hertz	Hz	Watt	W
Joule	J	Weber	Wb

Données d'usage fréquent

Terre		
Rayon moyen		$6{,}37 \times 10^{6}$ m
Masse		$5{,}98 \times 10^{24}$ kg
Distance moyenne au Soleil		$1{,}50 \times 10^{11}$ m
Lune		
Rayon moyen		$1{,}74 \times 10^{6}$ m
Masse		$7{,}36 \times 10^{22}$ kg
Distance moyenne à la Terre		$3{,}84 \times 10^{8}$ m
Soleil		
Rayon moyen		$6{,}96 \times 10^{8}$ m
Masse		$1{,}99 \times 10^{30}$ kg
Accélération de chute libre (g), valeur recommandée		9,806 65 m/s^2
Pression atmosphérique normale		$1{,}013 \times 10^{5}$ Pa
Masse volumique de l'air (à 0°C et 1 atm)		1,293 kg/m^3
Masse volumique de l'eau (entre 0°C et 20°C)		1000 kg/m^3
Chaleur spécifique de l'eau		4186 J/(kg·K)
Vitesse du son dans l'air	(0°C)	331,5 m/s
à la pression atmosphérique normale	(20°C)	343,4 m/s

Préfixes des puissances de dix

Puissance	Préfixe	Abréviation	Puissance	Préfixe	Abréviation
10^{-18}	atto	a	10^{1}	déca	da
10^{-15}	femto	f	10^{2}	hecto	h
10^{-12}	pico	p	10^{3}	kilo	k
10^{-9}	nano	n	10^{6}	méga	M
10^{-6}	micro	μ	10^{9}	giga	G
10^{-3}	milli	m	10^{12}	téra	T
10^{-2}	centi	c	10^{15}	péta	P
10^{-1}	déci	d	10^{18}	exa	E

Symboles mathématiques

$\propto$	est proportionnel à
$>$ ($<$)	est plus grand (plus petit) que
$\geq$ ($\leq$)	est plus grand (plus petit) ou égal à
$\gg$ ($\ll$)	est beaucoup plus grand (plus petit) que
$\approx$	est approximativement égal à
Δx	la variation de x
$\sum_{i=1}^{N} x_i$	$x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_N$
$\lvert x \rvert$	le module ou la valeur absolue de x
$\Delta x \to 0$	Δx tend vers zéro
$n!$	factorielle n : $n(n-1)(n-2) \ldots 2 \times 1$

Facteurs de conversion

Longueur

1 po = 2,54 cm (exactement)
1 m = 39,37 po = 3,281 pi
1 mille (mi) = 5280 pi = 1,609 km
1 km = 0,6215 mille
1 fermi (fm) = 1×10^{-15} m
1 ångström (Å) = 1×10^{-10} m
1 mille marin = 6076 pi = 1,151 mille
1 unité astronomique (UA) = $1{,}4960 \times 10^{11}$ m
1 année-lumière = $9{,}4607 \times 10^{15}$ m

Aire

1 $m^2 = 10^4$ $cm^2 = 10{,}76$ pi^2
1 $pi^2 = 0{,}0929$ m^2
1 $po^2 = 6{,}452$ cm^2
1 $mille^2 = 640$ acres
1 hecatre (ha) = 10^4 $m^2 = 2{,}471$ acres
1 acre (ac) = 43 560 pi^2

Volume

1 $m^3 = 10^6$ $cm^3 = 6{,}102 \times 10^4$ po^3
1 $pi^3 = 1728$ $po^3 = 2{,}832 \times 10^{-2}$ m^3
1 L = 10^3 $cm^3 = 0{,}0353$ pi^3
= 1,0576 pinte (É-U.)
1 pi^3 = 28,32 L = 7,481 gallons É.-U. = $2{,}832 \times 10^{-2}$ m^3
1 gallon (gal) É.-U. = 3,786 L = 231 po^3
1 gallon (gal) impérial = 1,201 gallon É.-U. = 277,42 po^3

Masse

1 unité de masse atomique (u) = $1{,}6605 \times 10^{-27}$ kg
1 tonne (t) = 10^3 kg
1 slug = 14,59 kg
1 tonne É.-U. = 907,2 kg

Temps

1 jour = 24 h = $1{,}44 \times 10^3$ min = $8{,}64 \times 10^4$ s
1 a = 365,24 jours = $3{,}156 \times 10^7$ s

Force

1 N = 10^5 dynes = 0,2248 lb
1 lb = 4,448 N
Le poids de 1 kg correspond à 2,205 lb.

Énergie

1 J = 10^7 ergs = 0,7376 pi·lb
1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J
1 cal = 4,186 J ; 1 Cal = 4186 J (1 Cal = 1 kcal)
1 kW·h = $3{,}600 \times 10^6$ J = 3412 Btu
1 Btu = 252,0 cal = 1055 J
1 u est équivalent à 931,5 MeV

Puissance

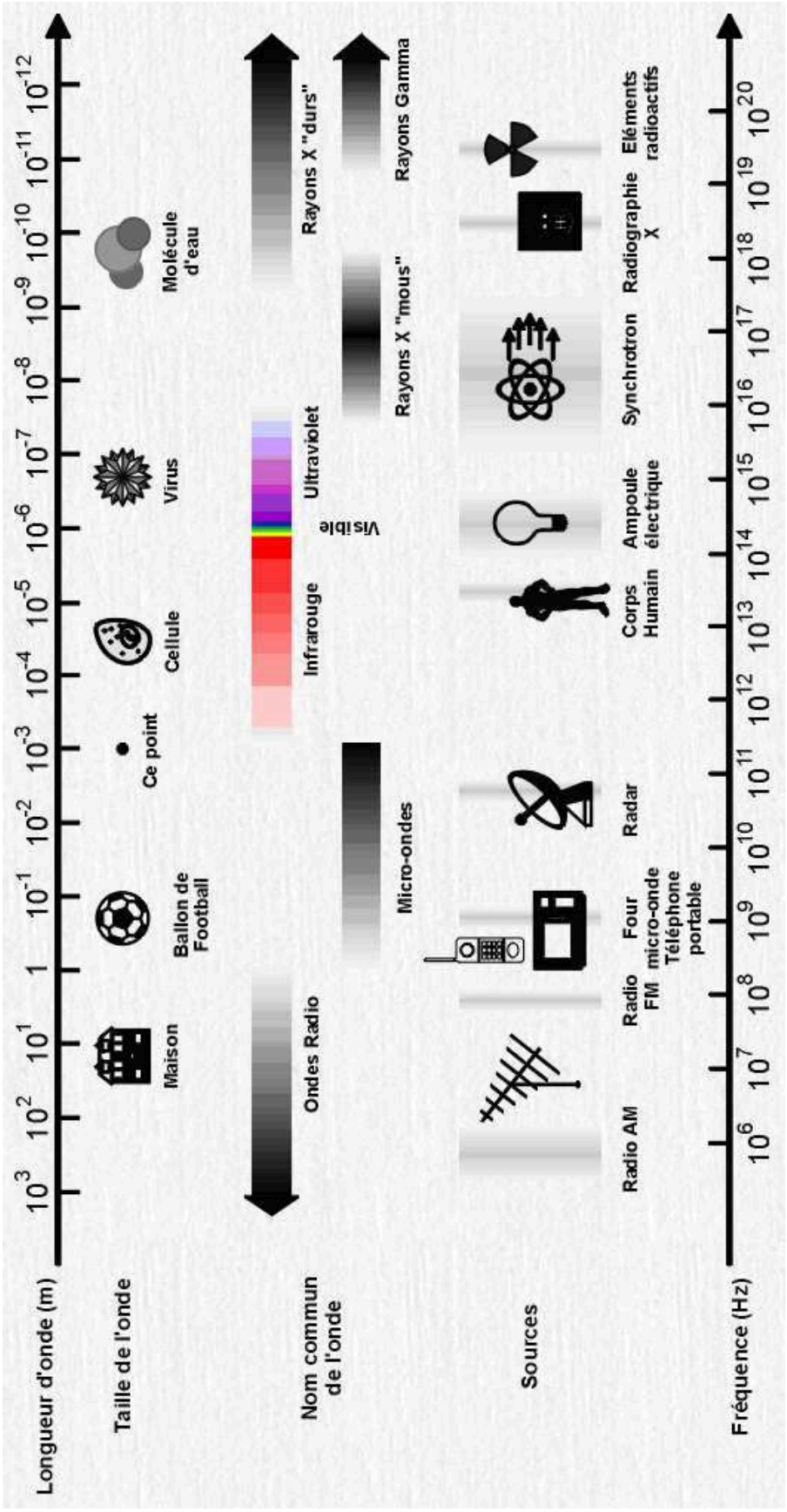
1 hp = 550 pi·lb/s = 745,7 W
1 cheval-vapeur métrique (ch) = 736 W
1 W = 1 J/s = 0,7376 pi·lb/s
1 Btu/h = 0,2931 W

Pression

1 Pa = 1 $N/m^2 = 1{,}450 \times 10^{-4}$ lb/po^2
1 atm = 760 mm Hg = $1{,}013 \times 10^5$ $N/m^2 = 14{,}70$ lb/po^2
1 bar = 10^5 Pa = 0,9870 atm
1 torr = 1 mm Hg = 133,3 Pa

L'alphabet Grec

Alpha	A	α	Iota	I	ι	Rhô	P	ρ
Bêta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	T	τ
Delta	Δ	δ	Mu	M	μ	Upsilon	Y	υ
Epsilon	E	ε	Nu	N	ν	Phi	Φ	ϕ ou φ
Zêta	Z	ζ	Xi	Ξ	ξ	Khi	X	χ
Êta	H	η	Omicron	O	o	Psi	Ψ	ψ
Thêta	Θ	θ	Pi	Π	π	Oméga	Ω	ω


Longueur d'onde (m)
Taille de l'onde
Nom commun de l'onde
Sources
Fréquence (Hz)
Maison
Ballon de Football
Ce point
Cellule
Virus
Molécule d'eau
Ondes Radio
Micro-ondes
Infrarouge
Visible
Ultraviolet
Rayons X "mous"
Rayons X "durs"
Rayons Gamma
Radio AM
Radio FM
Four micro-onde
Téléphone portable
Radar
Corps Humain
Ampoule électrique
Synchrotron
Radiographie X
Eléments radioactifs

Chapitre 12

Bibliographie

1. Physique ; Eugene HECHT ; 1er édition ; De Boeck ; ISBN 2-7445-0018-6.

2. Physique 6è ; Option de base ; Yvonne Verbist, Alain Bribosia, Pierre Materne, Luc Nachtergaele, Michel Vanderperren ; De Boeck ; ISBN 2-8041-2010-4.

3. Introduction à la physique ; Premier cycle ; Van De Vorst ; 2e édition ; De Boeck Université ; ISBN 2-8041-2503-3.

4. University physics ; Young & Freedman ; 10è édition ; International edition ; Sears and Zemansky's ; ISBN 0-201-70059-X.

5. Physique 6è ; Sciences générales ; Yvonne Verbist, Alain Bribosia, Luc Nachtergaele, Michel Vanderperren, Emmanuel Walckiers ; De Boeck ; ISBN 2-8041-4832-7.

6. Physique ; Tome V ; Paul Jacquart et Roger Migeotte ; Lège ; Sciences et lettres ; 1967.

7. Panorama de la physique ; Sous la direction de Gilbert Pietryk ; Belin ; Pour la science ; ISBN 978-2-7011-3972-2.

8. La physique par les objets quotidiens ; Cédric ray, Jean-Claude Poizat ; Belin, Pour la science ; 978-2-7011-4552-5.

9. La physique buissonnière ; Jean-Michel Courty, Edouard Kierlik ; Belin ; Pour la science ; 976-2-84245-105-9.

10. Physique 3 ; Harris Benson ; De Boeck Université.

11. Wikipédia

Index

Abbréviations des unités, 243
Accélération, 19
Acoustique
    définition, 77
Air
    régime stationnaire, 142
Algèbre, 242
Alphabet grec, 245
Amortissement des oscillations, 23
Amortisseur, 56
Amplitude, 16
Antennes, 224
Applications du pendule, 27
Arc-en-ciel, 183
    arc principal, 189
    arc secondaire, 190
    caractéristiques, 190
    formation, 188
Astronomie, 199

Bac à ondes, 99
Balançoire, 55
Bulles de savon, 199

Caisse de résonance, 144
CD, 199, 202
    colorisation, 215
CD-ROM, 202
Céphalopode, 199
Champ
    électrique, 227
    magnétique, 227
Chauve-souris, 124
Coléoptère, 199
Compétences, 10
Constante de phase, 18
Constantes physiques, 243
Contrôle de vitesse, 170
Cordes vocales, 145
Couplage, 53

Déphasage, 30
Décibel, 83
Détection des mouvements, 170
Diapason, 81
Différence de marche, 150
Diffraction, 99, 207
    etude mathématique, 210
    applications, 212
    des ondes, 117
    exercices, 219
    explications théoriques, 120
    lame de rasoir, 208
    par une fente, 210
    tête d'épingle, 208
Diffraction et interférence, 212
Diffration
    par un réseau, 216
Données d'usage fréquent, 244
Doppler
    blueshift, 172
    cardiologie, 170
    Christian, 165
    décalage des raies, 171
    définition de l'effet, 165
    détection des mouvements, 170
    en astronomie, 171
    mesure du débit sanguin, 170
    météorologie, 173
    radar, 170
    redshift, 172
Double périodicité, 64
Dynamique du MVS, 19

Echo, 105
Echographie, 105
Echolocation, 123
Effet de serre, 233

Elongation, 16
EM
    création, 224
    production, 224
Emetteur - récepteur, 223
Emetteur-récepteur, 224
Energie cinétique, 22
Energie d'un oscillateur, 22
Energie potentielle, 22
Energie sonore, 82
Excitateur, 53

Facteurs de conversion, 245, 246
Fizeau
    effet Doppler-Fizeau, 165
    Hippolyte, 165
Flûte de Pan, 145
Flux sanguin, 171
Fonction d'onde, 65
Force de rappel, 19
Formulaire
    d'algèbre, 242
    de géométrie, 241
Fréquence, 16
    fondamentale, 87
    harmonique, 87
Fresnel
    Augustin Jean, 30
    construction, 31
    méthode de, 33
    vecteur, 29
Fuseau, 135

Géométrie, 241
Grimaldi Francesco Maria, 207

Harmonique, 139
Haut-parleur, 121
Hauteur d'un son, 86
Hertz
    Heindrich Rudolf, 224
Hologramme, 204
Holographie, 204
Home-cinéma, 122
Huygens
    Christiaan, 101
    principe de, 100, 120

Hyperbole, 151

Impulsion, 61, 134
Infrarouge, 233
Instrument
    de musique, 144
Instruments
    à cordes, 144
    à vent, 145
Interférence
    applications, 199
    calcul de λ, 197
    constructive, 150
    destructive, 150
    différence de marche, 195
    en couches minces, 199, 201
    étude analytique, 149, 194
    exercices, 219
    experience, 148
    expérience de Young, 193
    franges, 193
    interfrange, 194
Interférométrie, 199
Interfrange, 194

Lignes
    de noeuds, 149
    de repos, 149, 150
    nodales, 149
    tempêtes, 150
Logarithmes
    propriétés, 84
Loi de la réfraction, 103
Longueur d'onde, 63
Lumière
    comportements, 185
    diffraction, 207
    dispersion, 183
    monochromatique, 184
    polychromatique, 184
    prisme, 183
    spectre, 183, 184
Lunettes de soleil, 235

Maxwell
    James Clerck, 226
    spéculation de, 226

Mesure de la longitude, 28
Mesure du temps, 27
Microscope, 214
Milieu de propagation, 61
Mode fondamental, 139
Modèle
    corpusculaire, 191
    ondulatoire, 191
Modulation
    d'amplitude, 229
    de fréquence, 229
Mouvement
    circulaire uniforme, 16
    composant, 32
    harmonique, 16
    périodique, 15
    résultant, 32
    vibratoire amorti, 23
Mur du son, 174
Musique, 92, 93
    instrument, 144
    note de, 93
    octave, 93
MVS, 16
    accélération, 18
    composition de deux, 29
    concordance de phase, 34
    déphasage, 30
    de même fréquence, 32
    dynamique du, 19
    Equations du, 17
    opposition de phase, 34
    vitesse, 18

Newton Isaac, 192
Noeuds, 134
Nombre d'onde, 67
Nombre quantique, 143

Oiseau, 199
Onde
    définition, 59
    périodique, 61
    vitesse, 62
Ondes
    bac à, 99
    classification, 60
    concordance de phase, 65
    courtes, 230
    diffraction, 99, 117
    électromécaniques, 60
    électromagnétiques, 224
    énergie, 68
    équation d', 70
    équation de propagation, 65
    exercices, généralités, 71
    exercices, propagation, 126
    exercices, superposition, 152
    fonction d', 65
    fuseau, 135
    gamma, 237
    GSM, 231
    harmonique, 139
    hertziennes, 228
    infrarouge, 233
    longitudinales, 61
    longues, 230
    longueur, 63
    mécaniques, 60
    micro-ondes, 231
    noeuds, 134
    nombre d', 67
    progressives, 60
    quantification, 139
    radar, 231
    radio, 228
    rayons X, 236
    réception, 122
    réflexion, 102
    réfraction, 108
    sinusoïdales progressives, 67
    sismiques, 114
    stationnaires, 134
    superposition, 131
    train d', 61
    transversales, 60
    TV, 231
    ultraviolet, 234
    unidimensionnelle, 65
    ventres, 135
    vitesse de propagation, 145
Ondes électromagnétiques

voir EM, 224
Ondes radio
faisceaux, 123
réception, 122
Ondes sonores
nature, 78
production, 77
sources, 78
vitesse des, 62
Ordre d'un spectre, 218
Oreille, 86
anatomie, 89
baladeur, 90
cochlée, 89
les dangers, 89
MP3, 90
nerf auditif, 89
tympan, 89
Orgue, 145
Oscillateur, 15
énergie, 22
Oscillation
amplitude, 16
définition, 15
exercices non résolus, 42
exercices résolus, 38
fréquence, 16
oscillateur, 15
période, 16
Oscillogrammes, 81
Oscilloscope, 81
Ozone, 235

Paon, 201
Papillon, 199, 201, 215
Pendule, 26
applications, 27
balistique, 28
de Foucault, 28
mesure de la longitude, 28
mesure du temps, 27
période propre, 27
simple, 53
Période, 16
Périodicité
dans l'espace, 65
dans le temps, 64
Phase, 18
concordance, 34
opposition de, 34
Physique moderne, 143
Plumes, 201
Prérequis, 9
Principe d'Huygens
diffraction, 120
Principe de Huygens, 100
Prisme, 183
Propagation
des ondes, 99
Puissance sonore, 82
Puissances de dix, 244
Pulsation, 18

Quantification, 139
Quasar, 172

Radar, 231
Radiastronomie, 124
Radioastronomie, 230
Radiographie, 238
Radiothérapie, 236
Rayons gamma, 237
Rayons X, 236
Réflexion
applications, 104
d'une impulsion, 134
dans une salle, 105
des ondes, 102
diffuse, 215
spéculaire, 215
Réfraction
du son, 113
explications théoriques, 109
loi de la, 103
Réseau
etude mathématique, 217
de diffraction, 216
Résonance, 55
acoustique, 55
applications, 55
balançoire, 55
caisse de, 144

condition de, 55
Résonateur, 53
Ressort, 23, 24
Röntgen Wilhem Conrad, 237

Savoirs, 9
Scanner, 236
Séismes, 56, 114
Sismomètre, 28
Snell
Willebrord Snell van Royen, 185
Son
caractéristiques, 82
complexe, 81
décibel, 83
harmonique, 81, 87
hauteur, 86
intensité, 82
mur du, 174
périodique, 81
propagation dans l'air, 113
puissance, 82
sinusoïdal, 81
timbre, 87
vitesse du, 81
Son et bruit, 80
Sonar, 105
Spectre
d'absorption, 184
de raies, 184
électromagnétique, 227
ordre du, 218
visible, 184
Spectre électromagnétique, 246
Spectroscope, 184
Spectroscopie
applications, 185
Superposition
des ondes, 131
principe de, 131
Symboles mathématiques, 244

Tâche d'huile, 199
Télescope
limite de grossissement, 214
Tension d'une corde, 145
Terre
masse de la , 28
rotation de la, 28
rotondité de la, 28
Timbre, 87
Train d'ondes, 61
Trou noir, 173
Tsunamis, 111

Ultraviolet, 234

Vecteur de Fresnel, 29
Ventres, 135
Vitesse, 19
Vitesse des projectiles, 28
VLT, 200
Voix, 145
von Fraunhofer Joseph, 207

Young Thomas, 193