



**Cours
Exercices
corrigés**

Jean-Paul Parisot, Patricia Segonds, Sylvie Le Boiteux

COURS DE PHYSIQUE

Optique

2^e ÉDITION

DUNOD

COURS DE PHYSIQUE

OPTIQUE

Jean-Paul Parisot

Professeur à l'université Bordeaux I

Patricia Segonds

Maître de conférences à l'université Joseph Fournier de Grenoble

Sylvie Le Boiteux

Professeur à l'université Bordeaux I

Préfacé par

André Ducasse

Professeur à l'université Bordeaux I

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © borislav15 – Adobe Stock

© Dunod, 2003

© 2020 pour la nouvelle présentation

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

EAN 978-2-10-081118-2

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. • Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

PRÉFACE

Durant les deux dernières décennies, une véritable révolution s'est déroulée dans le domaine de l'optique. En effet, après la découverte des lasers dans les années soixantes et leur développement extrêmement rapide dans les laboratoires de recherche au cours des deux décennies suivantes, une multitude d'applications ont émergé, sortant des laboratoires pour toucher notre vie de tous les jours : compacts-disques, lectures de codes-barres dans les caisses enregistreuses de grandes surfaces, communications par fibres optiques... Ainsi, de nouvelles technologies optiques sont venues modifier notre environnement, comme l'ont fait auparavant les technologies électroniques puis les technologies informatiques. Cependant, ces deux dernières disciplines se sont pratiquement créées en même temps qu'émergeaient leurs applications. L'optique, au contraire, bénéficie d'une très longue histoire et son évolution dans les dernières années présente des aspects tout à fait originaux.

De nouveaux domaines sont nés, bien sûr, avec l'avènement des sources lasers cohérentes de l'optique : la physique des lasers, l'optique non-linéaire, l'optique quantique, en particulier. Ils ont fait l'objet de beaucoup d'attention de la part des chercheurs et de nombreux ouvrages ont été publiés pour faire le point concernant nos connaissances sur le sujet. La nouvelle vision que nous avons maintenant de l'optique a cependant profondément modifié aussi la façon dont nous percevons ses bases anciennes. L'originalité de la propagation des ondes lasers cohérentes met en évidence directement les limitations de l'optique géométrique qui traite simplement la lumière comme un ensemble de rayons lumineux. Cette optique géométrique peut néanmoins continuer à être utilisée avec beaucoup de profit dans un grand nombre d'applications de sources lasers, à condition que ses limitations soient bien dominées. De même, l'optique physique (qui analyse les phénomènes d'interférences et de diffractions) et le traitement général des ondes électromagnétiques, ne peuvent plus être présentés de la même manière depuis que l'on dispose des sources cohérentes, si l'on souhaite permettre une formation bien connectée avec les soucis actuels des expérimentateurs. Or, dans tous ces derniers domaines, peu d'efforts pédagogiques ont été réalisés pour adapter notre ancienne façon de percevoir les phénomènes optiques aux nouvelles données expérimentales. C'est dans ce contexte que les auteurs de cet ouvrage, très familiers des technologies actuelles lasers, proposent très opportunément une présentation originale de l'optique géométrique.

L'enseignement de l'optique géométrique, tel qu'il est encore pratiqué le plus souvent, laisse une image un peu poussiéreuse de simple application mathématique des relations de Chasles ou de la géométrie des triangles, la physique sous-jacente étant réduite à quelques considérations très générales. Il ne peut alors vraiment intéresser que les étudiants férus de géométrie, qui vont d'ailleurs vite

se laisser d'une utilisation répétitive de notions mathématiques très simples. En fait, l'optique géométrique est un outil judicieux pour apprendre à manipuler la lumière, pour comprendre simplement des phénomènes physiques complexes ou encore pour interpréter la perception que nous avons du monde, via ce sens extraordinaire qu'est notre vision. La présentation de l'optique géométrique ne doit donc pas être uniquement une succession de relations indiquant comment un rayon lumineux se propage dans des milieux de différents indices. Elle doit permettre de trouver des solutions à des problèmes mettant en jeu la lumière, doit donner des clés pour des observations surprenantes du monde qui nous entoure.

C'est ce point de vue qu'ont choisi très opportunément les auteurs. Ainsi, dans leur introduction, ils indiquent la place de l'optique géométrique parmi les traitements de la lumière et, plus généralement, parmi les présentations des propagations d'ondes électromagnétiques. L'historique qui est donné souligne bien l'importance ancestrale du sujet et indique surtout comment se sont complétées peu à peu nos connaissances sur les propriétés de la lumière, avec une accélération remarquable dans les dernières décennies. Dans le cœur de l'ouvrage, on retrouve, bien sûr, toutes les notions de base essentielles pour dominer cette science des rayons lumineux. Mais elles sont le plus souvent accompagnées de considérations historiques, d'applications technologiques très actuelles ou encore d'interprétations de phénomènes naturels, ce qui ancre les notions mathématiques dans le contexte physique qui est leur raison d'être. Ainsi sont présentées, par exemple, des explications claires des phénomènes solaires surprenants (parabélies, arc-en-ciel, aplatissement du Soleil, rayon vert), des mirages, de la vision sous l'eau. Les techniques récemment développées de fibres optiques, de rétroreflecteurs solides, de lames séparatrices par réflexion totale frustrée sont données en illustration. Enfin, la partie consacrée aux instruments de l'optique géométrique commence par une description détaillée de notre œil considéré comme un récepteur complexe mais dont on peut avoir une vue schématique qui rend compte de beaucoup de ses caractéristiques, aussi bien sur le plan optique que physiologique. Les instruments « artificiels » de l'optique géométrique sont également présentés avec une grande simplicité, leurs propriétés essentielles étant bien mises en exergue.

La forme de l'ouvrage est bien adaptée au souci manifeste des auteurs de faire passer un message simple, clair grâce à un texte attractif. Les explications détaillées ont été préférées aux successions fastidieuses de relations, les schémas illustratifs sont faciles à lire, une utilisation systématique des encarts permet une première lecture rapide. Je voudrais enfin insister sur le bon choix qui a été fait d'exercices avec solutions présentés au lecteur à chaque chapitre. Ceux-ci doivent lui permettre de toucher du doigt systématiquement l'importance des notions qu'il vient d'apprendre.

Cet ouvrage constitue donc une présentation de l'optique géométrique qui arrive fort à propos lorsque l'on considère les besoins déjà importants et qui vont

encore beaucoup grossir, en formation dans cette matière ancienne venant de complètement se renouveler. Certes, l'ouvrage s'adresse en priorité aux étudiants de première et deuxième années des universités ou aux élèves de classes préparatoires des lycées qui trouveront là, sous forme très attractive, toutes les notions de base qu'ils doivent acquérir. Je ne doute cependant pas que nombre d'autres scientifiques non opticiens utilisent avec beaucoup de profit cet ouvrage pour satisfaire leur curiosité tant en ce qui concerne un certain nombre de nouvelles technologies que pour comprendre enfin quelques phénomènes naturels.

André Ducasse
Professeur de Physique
Université Bordeaux 1

AVANT-PROPOS

« On s'étonne trop de ce que l'on voit
rarement et pas assez de ce qu'on voit
tous les jours »

COMTESSE DE GENLIS

Dans la nature se produisent spontanément des phénomènes lumineux variés et spectaculaires dont les plus connus sont les arcs-en-ciel et les mirages. La représentation de la lumière à l'origine des phénomènes lumineux est faite ici dans le formalisme de l'optique géométrique qui privilégie son caractère de propagation. L'optique géométrique est une approximation de très grande importance et son développement est étroitement lié à notre histoire des sciences, domaine dans lequel sa contribution est particulièrement originale.

L'optique géométrique est une bonne approximation tant que les dimensions du système étudié sont grandes devant la longueur d'onde de la lumière qui s'y propage. Nous montrons alors que le principe de Fermat permet d'établir les lois de Snell-Descartes qui sont les fondements de l'optique géométrique. Ces lois sont appliquées à de nombreux exemples de dioptries plans (lames à faces parallèles, miroir plans, prisme...). Leur influence sur le parcours de la lumière étant expliqué, on introduira les conséquences sur la vision à travers ces systèmes.

Nous définissons ensuite la condition de l'approximation de Gauss qui permet d'établir la fameuse relation de conjugaison qui relie les positions d'un objet et de son image à travers n'importe quel dispositif optique (dioptrie, miroir sphérique ou lentille mince) mais aussi à travers des combinaisons comme la lentille épaisse, l'oculaire ou le microscope. Cette généralisation au formalisme de l'optique géométrique apporte une énorme simplification qui permet de déduire par des raisonnements simples toutes les autres relations nécessaires à la caractérisation d'un instrument.

Dans chaque chapitre nous proposerons des exemples dans le cours ou sous forme d'exercices accompagnés de leurs solutions afin d'insister sur la portée pratique dans la vie de tous les jours des différentes notions traitées. Si la représentation de la lumière par l'optique géométrique ne suffit pas pour expliquer toutes les curiosités naturelles, elle permet de démystifier de nombreux phénomènes lumineux. Nous aurons déjà un nouveau regard envers la nature !

Pour retenir l'esprit sans contrainte un enseignement doit intéresser par toutes ses applications ! C'est ainsi que dans une deuxième partie, nous attirerons l'attention, en relation directe avec le formalisme classique de l'optique géométrique, sur la description d'instruments classiques comme la loupe, le microscope, la lunette ou les jumelles, qui passionnent les jeunes générations. La connaissance de leur principe de fonctionnement assurera leur utilisation dans de bonnes conditions.

Remerciements

Pendant l'écriture de ce livre, nous avons bénéficié de l'aide d'un grand nombre de collègues auxquels nous voudrions rendre hommage.

Nous voudrions tout d'abord remercier Bruno Chassagne, Bernard Pouligny et Jacques Baudon qui ont consacré beaucoup de temps à une lecture critique du manuscrit.

Nous souhaitons également témoigner des discussions toujours enrichissantes que nous avons pu avoir avec Laurent Sarger et autres enseignants et chercheurs de notre entourage.

Enfin, nous remercions André Ducasse d'avoir accepté de préfacer cet ouvrage.

Les auteurs

TABLE DES MATIÈRES

<i>Préface</i>	V
<i>Avant-propos</i>	VIII
Chapitre 1. La lumière et l'optique géométrique	1
1. « Qu'est-ce que la lumière ? » : bref historique	1
2. La lumière dans le vide	3
3. Propagation de la lumière dans les milieux matériels	9
4. L'optique géométrique	11
5. Conclusion	13
À retenir	14
QCM	15
Exercices	16
Solutions	18
Chapitre 2. Du principe de Fermat aux lois de Snell-Descartes	21
1. Principe de Fermat	21
2. Énoncé des lois de Snell-Descartes	26
3. Principe du retour inverse de la lumière	27
4. Interprétation des lois de Snell-Descartes	28
5. Construction géométrique du rayon réfracté par les surfaces d'indices (construction de Huygens)	32
6. Approximation des petits angles : loi de Kepler	33
7. Applications	34
À retenir	36
Annexe 1. Rappels sur les fonctions trigonométriques	38
QCM	40
Exercices	41
Solutions	46
Chapitre 3. Le prisme	53
1. Définitions	53
2. Influence d'un prisme sur la marche d'un rayon	54
3. Analyse des formules du prisme	55
4. Influence de l'angle A du prisme sur l'angle de déviation D	59
5. Application aux mesures de l'indice absolu d'un milieu	60
6. Prismes à réflexion totale	64
À retenir	69
QCM	70
Exercices	71
Solutions	78
Chapitre 4. La vision des images et les conditions de Gauss	87
1. Vision d'images	87
2. Critères de qualité d'un système	97
3. Images réelles et images virtuelles	100
4. Objets réels et objets virtuels	100
5. Classification des systèmes optiques	101

<i>À retenir</i>	102
<i>Annexe 2. Vision du poisson sous l'eau</i>	103
<i>QCM</i>	107
<i>Exercices</i>	108
<i>Solutions</i>	112

Chapitre 5. Les dioptries sphériques **119**

1. Définitions	119
2. De la loi de Snell-Descartes à la relation de conjugaison	121
3. Analyse de la relation de conjugaison	124
4. Étude des foyers d'un dioptré	127
5. Autres formulations de la relation de conjugaison	129
6. Relation de Newton	130
7. Construction d'images à travers un dioptré sphérique	131
8. Grandissement transversal ou transverse γ	134
9. Grandissement longitudinal g	136
10. Déformation d'images à travers les dioptries sphériques	137
<i>À retenir</i>	138
<i>QCM</i>	140
<i>Exercices</i>	141
<i>Solutions</i>	145

Chapitre 6. Les miroirs sphériques **151**

1. Le miroir sphérique : définition	151
2. De la loi de Snell-Descartes à la relation de conjugaison pour un miroir sphérique	153
3. Étude de la relation de conjugaison du miroir sphérique	155
4. Étude des foyers d'un miroir sphérique	157
5. Nature de l'image formée par un miroir sphérique	158
6. Autres formulations de la relation de conjugaison	159
7. Relation de Newton	161
8. Construction d'images à travers un miroir sphérique	161
9. Le grandissement transversal γ et le grandissement longitudinal g	164
10. Un miroir sphérique n'est pas stigmatique	165
11. Un miroir stigmatique est parabolique	167
<i>À retenir</i>	167
<i>QCM</i>	169
<i>Exercices</i>	170
<i>Solutions</i>	175

Chapitre 7. Les lentilles minces **187**

1. Lentilles minces : définition et symbole	187
2. Relation de conjugaison des lentilles minces	190
3. Foyers et plans focaux d'une lentille mince	192
4. Autres formes de la relation de conjugaison	193
5. Analyse de l'effet d'une lentille mince	194
6. Images et grandissement	194
7. Exemples de lentilles minces	199
8. Les lentilles accolées	201
9. Lentilles mince séparant deux milieux d'indice différent	202
<i>À retenir</i>	203
<i>QCM</i>	205
<i>Exercices</i>	206
<i>Solutions</i>	211

Chapitre 8. Les combinaisons ou associations	219
1. Introduction	219
2. Formules universelles	220
3. Mise en équation d'un doublet quelconque	221
4. Foyers d'un doublet	222
5. Relation de Newton	222
6. Distances focales d'un doublet	223
7. Points principaux H et H' et relation de Descartes	225
8. Rapport des distances focales	228
9. Vergence d'une association : la formule de Gullstrand	228
10. Construction d'images et grandissement	229
11. Application	231
12. Formulation matricielle de l'étude des associations	234
À retenir	238
QCM	239
Exercices	240
Solutions	250
 Chapitre 9. L'œil	 263
1. Introduction	263
2. Description de l'œil	263
3. Quelques caractéristiques de l'œil	266
4. Schéma optique de l'œil	267
5. Œil emmétrope (normal)	269
6. Les défauts de l'œil et comment les corriger	270
À retenir	274
QCM	275
Exercices	276
Solutions	279
 Chapitre 10. Instruments et photométrie	 285
1. Définitions	285
2. Description de quelques instruments	296
3. Quelques éléments de photométrie énergétique	303
À retenir	304
QCM	311
Exercices	312
Solutions	316
 Constructions	 323
1. Miroirs plans	323
2. Dioptries sphériques	324
3. Miroirs sphériques	326
4. Lentilles minces	328
5. Associations	333
6. Boîtes mystérieuses	337
Solutions	338
 Index	 353

CHAPITRE 1

LA LUMIÈRE ET L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

Pré-requis

Ce chapitre reprend l'essentiel des notions élémentaires sur les ondes lumineuses utiles à l'optique géométrique. Quelques-unes d'entre elles ont été vues au lycée.

Objectif

Après un bref rappel historique sur la lumière au fil des siècles, ce chapitre présente le spectre des ondes électromagnétiques. La description de la propagation de la lumière dans le vide ou dans des milieux matériels isotropes et transparents est abordée à partir de principes. Enfin, nous définissons le cadre dans lequel s'inscrit l'emploi de l'optique géométrique.

1. « QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ? » : BREF HISTORIQUE

L'étude des phénomènes lumineux a de tout temps passionné l'homme et l'histoire des sciences a été marquée par de nombreux débats concernant la nature de la lumière. À la question simple, « qu'est-ce que la lumière », les réponses ont été variées. Cependant, différentes descriptions de la lumière, basées sur l'observation quotidienne, se sont développées au cours des siècles.

Ainsi, dans l'Antiquité on pensait que la lumière était issue de leurs propres yeux sous une forme alimentée par une sorte de feu. Cette théorie du feu visuel affirmait que c'était l'œil qui émettait de la lumière, permettant ainsi la vision des objets. Euclide, un fervent défenseur de ces idées, a fondé une théorie basée uniquement sur la notion de rayon lumineux ; elle a permis d'en déduire les principes du retour inverse et de la propagation rectiligne de la lumière.

Peu à peu, les savants ont compris que la lumière était une entité propre, indépendante du sujet qui la regarde. Ibn al-Haitham, plus connu sous le nom d'Ahlazen, scientifique arabe du XI^e siècle, alors fort lu en Occident, a été l'un des premiers à développer cette

idée. Il imagine diverses expériences destinées à mettre en évidence l'influence de la lumière sur l'œil. En effet, comment une lumière intense, celle du soleil par exemple, issue de l'œil de l'observateur, peut-elle le blesser et l'aveugler ? De la même façon, comment expliquer que la finesse des détails d'un objet ne soit observable que lorsque les conditions d'éclairement sont bien maîtrisées ? Enfin, ce n'est pas parce que l'on ferme les yeux que l'image du ciel à travers une fenêtre disparaît. Toutes ces observations sont la preuve évidente que la lumière a une identité propre et que nous ne faisons que la subir à travers notre vision. Ahlazen a proposé de nombreuses expériences, faisant ainsi preuve d'une créativité tout à fait exceptionnelle.

Jusqu'au XIII^e siècle, aucune idée nouvelle n'est apparue ; pourtant, certaines observations, comme le phénomène de l'arc-en-ciel ou la décomposition de la lumière par un prisme de verre, suggèrent bien l'existence d'une double nature de la lumière, ondulatoire et corpusculaire.

Au XVII^e siècle, les scientifiques se sont largement querellés à ce sujet sans qu'un réel accord puisse être trouvé. Galilée, après avoir construit un des premiers microscopes, s'émerveille de l'observation des planètes. Selon lui, la lumière est composée de grains rebondissant sur une surface réfléchissante. Au contraire, s'appuyant sur les phénomènes de réflexion, Descartes et Newton sont de fervents défenseurs de la nature corpusculaire de la lumière. Parallèlement, Fermat établit que la lumière se propage selon un principe de moindre temps, plus vite dans le vide que dans les autres milieux. Il lutte ainsi contre les idées de Descartes, selon lesquelles la lumière va plus vite dans la matière que dans le vide. En 1685, les premières expériences de diffraction faites par Grimaldi, faisant passer la lumière à travers un fil ou un cheveu, démontrent le caractère ondulatoire de la lumière. En effet, un fil placé sur le trajet d'un faisceau lumineux produit une figure de diffraction composée de structures complexes qui font penser au comportement des rides provoquées à la surface de l'eau par un caillou.

En 1821, Augustin Fresnel définit la lumière comme une onde, c'est-à-dire comme une perturbation voyageant ou se propageant sans déplacement de matière. C'est un phénomène bien connu de tous les enfants habitués à faire des ricochets dans l'eau : les rides provoquées par un caillou à la surface de l'eau se propagent circulairement autour d'un point d'impact sans produire de transport d'eau. On parle dans ce cas d'ondes mécaniques ; celles-ci existent dans des milieux dont les propriétés élastiques leur permettent de revenir à leur état d'équilibre. Au XIX^e siècle, Faraday, puis Maxwell, montrent que la lumière est une onde électromagnétique. Il semble alors exclu d'attribuer une nature autre qu'ondulatoire à la lumière.

Pourtant, en 1887, Hertz découvre l'effet photoélectrique : si l'on envoie sur un matériau métallique un faisceau dont la longueur d'onde est supérieure à un certain seuil, on lui arrache des électrons. La valeur du seuil est directement reliée à la nature même du métal. Aucune interprétation de l'effet photoélectrique n'était possible avec une théorie ondulatoire. De même, un morceau de métal chauffé à très haute température (1 500 °C) émet un rayonnement, appelé rayonnement du corps noir, qui ne dépend pas de la nature du corps, mais uniquement de sa température.

En 1905, Albert Einstein publie un article révolutionnaire qui lui vaut le prix Nobel, dans lequel il interprète ces deux expériences. Il prouve ainsi la nature corpusculaire de la lumière et montre que, si elle est composée de photons de même fréquence ν qui se déplacent à la vitesse de la lumière, ils ont tous la même énergie.

Enfin, l'avancée du XX^e siècle, avec le développement de la dualité onde-corpuscule dû à de Broglie, à Heisenberg et à Dirac, met un point final à cette querelle : la lumière a

effectivement ce double aspect et les échelles de mesure auxquelles on travaille peuvent mettre en avant l'une ou l'autre nature, ondulatoire ou corpusculaire.

2. LA LUMIÈRE DANS LE VIDE

Les ondes électromagnétiques sont des phénomènes périodiques qui, contrairement au son, se propagent aussi bien dans un milieu matériel que dans le vide. Les physiciens du XIX^e siècle avaient d'ailleurs imaginé un milieu matériel remplissant l'univers, l'éther, porteur des ondes électromagnétiques. Les expériences de Michelson ont complètement anéanti ce concept.

2.1. Le spectre électromagnétique dans le vide

Les ondes électromagnétiques sont constituées d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$ qui varient périodiquement dans le temps. Considérons le cas simple d'ondes sinusoïdales se propageant dans le vide. Dans ce cas, les deux champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont situés dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde repérée par le vecteur $\vec{k}$ et ces trois vecteurs forment un trièdre direct $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{k})$.

La plupart des effets lumineux étant directement reliés à l'existence du champ électrique, l'optique s'intéresse essentiellement à l'évolution de $\vec{E}$. Si l'on suppose ce dernier dirigé selon l'axe Ox , il oscille en fonction du temps le long de cet axe comme $E_x(\vec{r}, t) = E_0(\vec{r}) \sin \frac{2\pi t}{T}$; E_0 est l'amplitude du champ électrique et sa direction définit ce que l'on appelle la polarisation du champ. Cette dernière notion n'intervenant pas en optique géométrique, elle ne sera pas détaillée ici.

En raison de leur caractère périodique, les ondes électromagnétiques sinusoïdales se reproduisent identiques à elles-mêmes au bout d'un certain temps T , appelé période temporelle et exprimé en secondes; la période est l'inverse de la fréquence ν , exprimée en hertz (symbole Hz). Le MHz (10^6 Hz) et le GHz (10^9 Hz) sont des multiples de fréquence couramment utilisés. On peut aussi définir ω , la pulsation, exprimée en radians par seconde, par : $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$.

Si l'on mesure la distance parcourue par le champ électrique pendant la période T , on obtient sa longueur d'onde λ . Elle est exprimée en mètres ou en sous-multiples comme par exemple le micromètre appelé micron (10^{-6} m, symbole μm), le nanomètre (10^{-9} m, symbole nm) ou l'angström (10^{-10} m, symbole Å), le picomètre (10^{-12} m, symbole pm), le femtomètre (10^{-15} m, symbole fm).

Lorsqu'une seule fréquence ν (ou, de manière équivalente, une des quantités T , ω ou λ) caractérise une onde électromagnétique, elle est dite monochromatique. Dans le cas contraire, elle est polychromatique.

Les ondes électromagnétiques couvrent une très large gamme de fréquences, depuis les ondes radio, dont la fréquence est voisine de quelques 10^3 Hz, jusqu'aux rayons γ de très haute énergie, de fréquence 10^{19} Hz à 10^{22} Hz, provenant naturellement de l'espace

interstellaire ou du soleil. Dans le vide ou dans la matière, les ondes électromagnétiques obéissent à une même classification selon la valeur de leur fréquence ν , présentée dans le tableau 1.1. On peut aussi choisir de définir les différentes parties du spectre électromagnétique par leur longueur d'onde (voir *tableau 1.1*); cependant, cette distinction dépend de la relation qui lie λ à ν et donc du milieu dans lequel l'onde se déplace.

Tableau 1.1 • Présentation du spectre électromagnétique dans le vide

Fréquences $\nu = 1/T$		Longueur d'onde λ dans le vide		Type d'ondes
Hz	Autre unité	m	Autre unité	
$3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5$	3 – 300 KHz	$10^3 - 10^5$		Radio basse fréquence (LF)
$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	0,3 – 3 MHz	$10^2 - 10^3$		Radio moyenne fréquence
$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$		$10 - 10^2$		Radio haute fréquence
$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$		1 – 10		Radio VHF
$3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$	0,3 – 3 GHz	$10^{-1} - 1$		Radio UHF
$3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$		$10^{-3} - 10^{-1}$		Micro-ondes
$3 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$	0,3 – 400 THz	$0,7 \cdot 10^{-6} - 10^{-3}$		IR
$4 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$		$0,4 \cdot 10^{-6} - 0,7 \cdot 10^{-6}$	0,4 μ m – 0,7 μ m	Visible
$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$		$10^{-9} - 0,4 \cdot 10^{-6}$		UV
$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{19}$		$10^{-11} - 10^{-9}$	10 pm – 1 nm	Rayons X
$3 \cdot 10^{19} - 3 \cdot 10^{22}$		$10^{-14} - 10^{-11}$	10 fm – 10 pm	Rayons γ

Ainsi, dans le vide, la fréquence d'une onde électromagnétique ν est reliée à sa longueur d'onde λ par la relation $\lambda \nu = c$, où c est la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. C'est en fait la plus grande vitesse qui puisse exister dans l'univers. La vitesse c est l'une des constantes fondamentales de la physique et vaut 299 792,458 km.s⁻¹. On utilise souvent sa valeur approchée $c \approx 3.10^8$ m.s⁻¹. L'encart historique présente des expériences qui ont permis de la mesurer.

Précisons que l'on devrait en fait parler de célérité de la lumière, car le terme de vitesse est en général réservé à un transport matériel, celui de célérité aux ondes; l'usage veut cependant que l'on parle de vitesse de la lumière.

Dans le vide, la fréquence d'une onde électromagnétique monochromatique ν est reliée à sa longueur d'onde λ par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT$$

c est sa vitesse dans le vide, célérité ou vitesse de la lumière.

$c = 299\,792,458 \text{ km.s}^{-1}$. On utilise couramment la valeur approchée $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Encart historique. Quelques mesures historiques de la vitesse de la lumière

Galilée (1564-1642) a tenté de mesurer directement la vitesse de la lumière en plaçant deux personnes à quelques kilomètres de distance. Chacune était équipée d'une lanterne. La première éteignait sa lampe et mettait son chronomètre (un sablier !) en route ; la seconde, apercevant l'extinction de la première lanterne, éteignait la sienne. À l'extinction, le premier observateur arrêtait son chronomètre. À condition de réagir instantanément, le temps mesuré correspondait donc au temps mis par la lumière pour effectuer l'aller et retour. Galilée ne soupçonnait pas que, compte tenu du temps de réaction des observateurs, la lumière avait le temps d'effectuer pendant l'expérience un parcours équivalent à plusieurs fois le tour de la Terre !

L'existence de c en tant que vitesse finie a été prouvée pour la première fois en 1676 par un astronome danois Olaüs Römer (1644-1710) qui travaillait à l'Observatoire de Paris. Il avait remarqué, depuis la découverte par Galilée, en 1610, des satellites de Jupiter, un décalage systématique du début des éclipses de ces satellites par la planète. Römer attribua cette variation à une modification, d'une éclipse à l'autre, de la distance à parcourir par la lumière entre le satellite L et la Terre. Entre les positions extrêmes Terre-Jupiter (notées 1 et 3 sur la figure 1.1), l'instant de disparition du satellite s'effectue avec un retard ou une avance qui peut atteindre 996 secondes. C'est le temps mis par la lumière pour traverser le diamètre de l'orbite terrestre, soit environ $2 \times 150 \cdot 10^6 \text{ km}$. On peut ainsi accéder à la vitesse de la lumière en écrivant :

$$c = \frac{2 \times 150 \cdot 10^6}{996} \approx 300\,000 \text{ km.s}^{-1}$$

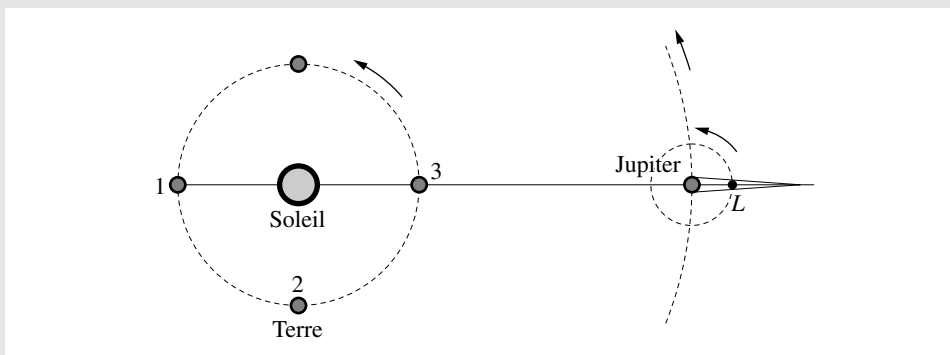


Figure 1.1 • Principe de la mesure de la vitesse de la lumière d'après les éclipses des satellites de Jupiter.

Depuis ces premières expériences, bien d'autres tentatives de mesure de la vitesse de la lumière ont été menées, utilisant cette fois des méthodes entièrement terrestres. En 1920, Albert Michelson a obtenu pour la première fois une valeur, par la suite confirmée par des centaines d'expériences. Dans son expérience, une source de lumière émet un rayonnement lumineux depuis le mont Wilson en direction d'un miroir tournant situé à 35 km de distance sur le mont Baldy. Seule une position déterminée du miroir permet de renvoyer le faisceau dans la direction opposée. Grâce à une mesure topographique précise à 0,3 cm près, et connaissant la vitesse de rotation du miroir de renvoi, on peut relier le temps $t = \frac{2l}{c}$ que met le rayon lumineux à revenir à son point de départ à la vitesse de rotation du miroir. Plusieurs centaines de mesures aboutirent à une valeur de la vitesse de la lumière égale à $299\,796\text{ km.s}^{-1}$.

En fait, la précision atteinte sur la mesure de c est limitée par celle que l'on peut avoir sur les mesures de longueur et de temps. Le mètre étalon de 1960 était défini à partir de la longueur d'onde dans le vide d'une transition de l'atome de krypton 86. Cependant, sa précision était limitée. Le développement des lasers continus, dont la fréquence peut être donnée à quelques kHz près, a permis une définition plus précise du mètre : « **le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de $1/299\,792\,458^{\circ}$ de seconde** ». Cette définition a été adoptée le 20 octobre 1983 à la 17^e Conférence générale des poids et mesures.

La lumière que nous voyons n'est qu'une petite partie du vaste spectre électromagnétique défini dans le tableau 1.1, appelée « le visible ». Généralement, dans le vide comme à l'intérieur de la matière, elle résulte de la superposition de plusieurs ondes électromagnétiques monochromatiques (lumière polychromatique). Dans le vide, les longueurs d'onde des radiations visibles sont comprises entre environ $\lambda = 400\text{ nm}$ et $\lambda = 800\text{ nm}$ ($\nu = 750 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$ et $\nu = 375 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$). En fait, les limites du spectre visible varient selon l'acuité de l'œil de l'observateur et selon l'intensité perçue.

Les origines des différentes sources visibles peuvent être très variées. Ainsi, l'éclairage issu du Soleil ou fourni par une lampe à filament est composé de toutes les longueurs d'onde du visible ; c'est un spectre continu. En revanche, l'éclairage souvent employé dans les tunnels d'autoroute est fourni par des lampes contenant par exemple des vapeurs de sodium (Na). Elles n'émettent donc, en accord avec le spectre de raies caractéristique du gaz utilisé, que quelques longueurs d'onde du visible ; ce spectre est dit « discret », par opposition au spectre continu de la lampe à filament. Enfin, la plupart des caisses de supermarchés sont équipées de systèmes de lecture de codes barres qui utilisent un faisceau visible monochromatique fourni par une diode laser dont la longueur d'onde se situe aux alentours de 670 nm. Le spectre lumineux d'émission de la diode laser est dans ce cas monochromatique.

Pour séparer les différentes longueurs d'onde d'une source, une méthode expérimentale est proposée au chapitre 3. Elle consiste en l'observation du spectre lumineux à travers un prisme de verre.

Les longueurs d'onde ultraviolettes et infrarouges forment deux régions adjacentes du spectre visible qui peuvent être également assimilées au spectre lumineux. Les limites du spectre visible lui-même sont d'ailleurs mal définies et on convient souvent de dire que le rayonnement ultraviolet s'étale dans le vide de 400 nm à 10 nm. Il est présent dans la lumière solaire où il est très utile car il produit chez l'homme la vitamine D, et provoque