

Sous la direction de **Stéphane Cardini**

Damien Jurine | **Bernard Salamito**

Valérie Bouland | Rachel Comte | François Crépin

Luc Gauthier | Tom Morel | Marie-Noëlle Sanz

PHYSIQUE

PCSI

TOUT-EN-UN

7^e édition

DUNOD

l'intégrale

Couverture : création Hokus Pokus, adaptation Studio Dunod

Retrouvez nos ouvrages pour les prépas scientifiques ici



<http://dunod.link/prepassc>

NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70% de nos livres en France et 25% en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2024
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-086465-2

Les auteurs



Stéphane Cardini

Ancien élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences physiques, professeur de chaire supérieure. Depuis plus de 20 ans, il enseigne en seconde année de CPGE à Saint-Cyr-l'École et participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral. Il a notamment dirigé cet ouvrage. Il est chevalier des Palmes académiques et président honoraire de la Société des agrégés.



Damien Jurine

Ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres, ex-Ulm), il est titulaire d'un doctorat de géophysique interne de l'Université Paris VII et professeur agrégé de sciences physiques. Depuis 18 ans, il enseigne avec passion la physique dans la filière PCSI au lycée Saint-Louis à Paris.



Bernard Salamito

Ancien élève de l'ENS (Paris Sciences Lettres, ex-Ulm), il est professeur de chaire supérieure enseignant au lycée François 1^{er} à Fontainebleau en classe de seconde année MP. Il a participé aux jurys de plusieurs concours, à l'écrit et à l'oral.



Valérie Bouland

Diplômée de Télécom SudParis, ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégée de sciences physiques et docteure en télécommunications de Télécom Paris. Elle a enseigné en PTSI, PT et PC et est actuellement en poste en MPSI au lycée Claude Bernard, à Paris. Elle est membre de jury de concours.



Rachel Comte

Ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), elle est agrégée de sciences physiques. Après une année de médiation au Palais de la découverte, elle a enseigné 6 ans en première année de CPGE au lycée Janson de Sailly à Paris. Elle est maintenant professeure en première année de CPGE au lycée Marcelin Berthelot à Saint-Maur-des-Fossés. Elle a co-écrit le livre d'annales *Physique-Chimie, sujets portant sur le programme de 1^{re} année* chez Dunod. Elle participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral.



François Crépin

Ancien élève de l'ENS Lyon, il est professeur agrégé de sciences physiques. Après avoir soutenu une thèse de physique théorique à l'Université Paris Sud (aujourd'hui Paris-Saclay), il a été chercheur en Allemagne et en France. Il enseigne aujourd'hui en PCSI au lycée Saint-Louis à Paris.



Luc Gauthier

Diplômé de l'École nationale supérieure des industries chimiques (ENSIC), élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences-physiques. Après avoir enseigné au lycée La Fayette de Clermont-Ferrand en seconde année de CPGE, il enseigne en première année de CPGE à Saint-Cyr-l'École et participe à des jurys de concours.



Tom Morel

Agrégé de sciences physiques, il enseigne en MPSI au lycée Marcelin Berthelot à Saint-Maur-des-Fossés et participe aux jurys des concours ENS et CCINP, tant à l'écrit qu'à l'oral. Il a co-écrit le livre d'annales *Physique-Chimie, sujets portant sur le programme de 1^{re} année* chez Dunod.

Avant-propos

La nouvelle édition du *Tout-en-un* reprend les fondamentaux qui ont assuré, édition après édition, le succès de l'ouvrage, tout en évoluant pour rester le plus proche, tant de la formation initiale des lycéens que des attentes des jurys de concours.

Les exercices et problèmes ont ainsi été remaniés. Certains, devenus obsolètes, ont été remplacés par d'autres, plus formateurs et plus en phase avec les énoncés de concours actuels.

Les étudiants des classes préparatoires, des universités et des préparations aux concours de recrutement trouveront dans cet ouvrage :

- un cours complet qui respecte les programmes officiels, afin de les guider dans leur apprentissage ;
- une méthodologie systématique, qui souligne les méthodes classiques, indispensables pour comprendre comment appréhender un problème de physique, puis le résoudre au mieux ;
- le programme officiel et le sommaire des exercices ;
- de très nombreux exercices de niveaux variés, en fin de chapitres, certains issus de problèmes de concours, souvent extrêmement récents, et de sujets d'oraux très actuels. La longue expérience au sein de jurys de concours des auteurs a permis de confronter les différentes pratiques et de sélectionner les exercices et problèmes les plus formateurs, adaptés à tous les étudiants, dont le niveau de difficulté est signalé :
 - ★ exercices de cours, dont la maîtrise est indispensable ;
 - ★★ exercices simples et formateurs ;
 - ★★★ exercices de niveau ambitieux ;
 - ★★★★ exercices de niveau très élevé, pour se préparer aux classes étoilées les plus exigeantes.

Le livre rassemble un très grand nombre d'exercices, afin que les étudiants les plus rapides trouvent à s'exercer efficacement. Néanmoins, un étudiant de niveau intermédiaire n'aura pas le temps pendant son année de tous les traiter, ce qui n'est pas réhibitoire avec une passage en seconde année puis une belle intégration.

Les auteurs remercient tous les collègues et lecteurs qui prirent le temps de nous adresser leurs remarques et leurs encouragements.

Pour finir, puisse ce livre être un compagnon qui vous aidera à vous épanouir dans votre travail et à apprécier cette introduction au noble travail d'ingénieur !

Stéphane CARDINI

« Mode d'emploi » d'un chapitre

Une introduction présente le sujet traité et le plan suivi.

Oscillateur harmonique

6

Dans ce chapitre, on introduit un modèle physique qui produit un signal sinusoïdal appelé l'**oscillateur harmonique**. Les adjectifs harmonique et sinusoïdal sont synonymes : on rencontre parfois les expressions « signal harmonique » ou « oscillateur sinusoïdal ».

Les définitions importantes sont placées dans un encadré gris, les remarques et les exemples comportent un filet vertical sur la gauche.

On appelle alors la **profondeur de champ** l'étendue de la zone de netteté obtenue sur la photographie. Il s'agit alors de la distance entre les premiers et les derniers éléments nets d'une image.

Si une photo comporte de nombreux éléments nets on parlera d'une grande profondeur de champ. Si à l'inverse seuls quelques plans de l'objet apparaissent nets on parlera d'une courte (ou faible) profondeur de champ.

Remarque

Les conséquences de la loi d'Ohm qui ont été vues en courant continu sont valables en régime variable, notamment les formules des diviseurs de tension et de courant.

Exemple

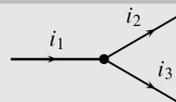
La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de $50\ \Omega$. Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre du $k\Omega$, donc très supérieures à R_s , il se comporte pratiquement comme un générateur idéal, d'après la remarque de la page 111.

À la suite du cours, dans chaque chapitre, sont placées différentes questions de méthodologie entièrement traitées.

MÉTHODOLOGIE

Comment utiliser la loi des nœuds ?

▷ Les intensités entrantes sont égales aux intensités sortantes : $i_1 = i_2 + i_3$.



Le programme officiel pour chaque thématique et le sommaire des exercices sont proposés à la fin de chaque cours.

PROGRAMME OFFICIEL ET SOMMAIRE DES EXERCICES	
NOTIONS ET CONTENUS	CAPACITÉS EXIGIBLES
Oscillateur harmonique. Exemples du circuit LC et de l'oscillateur mécanique.	<p>Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales.</p> <p>▶ 6.C1 6.C2</p> <p>Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation.</p> <p>▶ 6.C3</p> <p>▷ 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5</p> <p>Réaliser un bilan énergétique.</p> <p>▶ 6.C4</p> <p>▷ 6.6 6.7 6.8</p>

Des exercices, dont la difficulté est traduite par des étoiles, sont proposés en fin de chapitre. On distinguera :

- les exercices de cours, qui reprennent les capacités exigibles du programme et classés 1 étoile ;

	EXERCICES ★ (LE COURS)	
<p>11.C1 Amplificateur non inverseur Le circuit est figure 11.7 p. 301.</p> <p>1) Établir la fonction de transfert du montage.</p> <p>2) Calculer l'impédance d'entrée.</p>		

- les autres exercices, classés de 2 à 4 étoiles.

<p>1.1 Doublage de fréquence</p>	<p>Le rayon laser utilisé à l'observatoire du CERGA pour mesurer la distance Terre-Lune est obtenu par doublage de fréquence à partir d'un laser de longueur d'onde $\lambda_1 = 1,064 \mu\text{m}$.</p> <p>1) Quelle est la longueur d'onde λ_2 de la lumière envoyée vers la Lune ? Quelle est sa couleur ?</p> <p>2) On envoie en fait des impulsions durant 0,1 ns. Calculer le nombre d'oscillations du signal lumineux dans une impulsion.</p>
------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tous les exercices sont entièrement corrigés.

	CORRIGÉS	
<p>7.C1</p> <p>1) C'est la sortie du montage quand l'entrée est nulle pour $t < 0$ et est une constante positive pour $t > 0$.</p> <p>2) Plus la résistance est importante, plus les pertes Joules sont importantes, donc plus le système est amorti : ξ_2 (qui correspond à R_2) $>$ ξ_1 (qui correspond à R_1) ou $Q_2 < Q_1$. Le graphe de gauche oscille beaucoup, le système est peu amorti, il correspond à R_1, résistance la plus faible ; le graphe de droite est très amorti, il correspond à R_2, résistance la plus forte.</p>		

Table des matières

Présentation des auteurs	3
Avant-propos	5
Mode d'emploi	7
OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE	21
1 Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique	21
1 Description et propriétés de la lumière	21
2 Les sources lumineuses	23
3 Modèle géométrique de la lumière	25
4 Lois de Snell-Descartes	26
Méthodologie, programme officiel et sommaire des exercices	29
Exercices	30
Corrigés	34
2 Optique géométrique	39
1 Miroir plan	39
2 Systèmes centrés et approximation de Gauss	40
3 Lentilles minces	44
4 Projection d'une image par une lentille	50
Méthodologie	53
Programme officiel et sommaire des exercices	55
Exercices	56
Corrigés	59

TABLE DES MATIÈRES

3	Modèles de dispositifs optiques	63
1	L'œil	63
2	L'appareil photo	65
3	La fibre à saut d'indice	71
4	Quelques dispositifs optiques à plusieurs lentilles	74
	Méthodologie	78
	Programme officiel et sommaire des exercices	81
	Exercices	82
	Corrigés	88
	SIGNAUX ÉLECTRIQUES	97
4	Circuits électriques dans l'ARQS	97
1	Intensité du courant électrique	97
2	Circuit électrique	103
3	Tension électrique	104
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	107
5	Associations de dipôles	111
6	Ponts diviseurs	112
7	Résistances de sortie et d'entrée	113
8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	114
9	Puissance et énergie en régime variable	116
	Méthodologie	118
	Programme officiel et sommaire des exercices	120
	Exercices	121
	Corrigés	126
5	Circuit linéaire du premier ordre	133
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	133
2	Modélisation	134
3	Régime libre du circuit RC	137
4	Étude de la tension $u_R(t)$	138
5	Exemple de circuit inductif	140
6	Simulation	142
	Méthodologie	144
	Programme officiel et sommaire des exercices	148
	Exercices	149

Corrigés	155
6 Oscillateur harmonique	163
1 Un oscillateur harmonique mécanique	163
2 Un oscillateur harmonique électrique	167
Méthodologie	169
Programme officiel et sommaire des exercices	172
Exercices	173
Corrigés	176
7 Circuit linéaire du second ordre	179
1 Étude expérimentale d'un circuit <i>RLC</i> série	179
2 Équation différentielle sur la tension u_C	181
3 Détermination de la tension u_C	182
4 Durée du régime transitoire	183
5 Réponse à un signal créneaux	185
6 Bilan énergétique	186
7 Analogie entre un circuit <i>RLC</i> et un oscillateur mécanique	187
Méthodologie	188
Programme officiel et sommaire des exercices	190
Exercices	191
Corrigés	194
8 Régime sinusoïdal - Résonance	199
1 Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	199
2 Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	201
3 Impédance complexe	204
4 Résonance d'intensité dans un circuit <i>RLC</i> série	207
5 Résonance de charge d'un circuit <i>RLC</i> série	211
Méthodologie	213
Programme officiel et sommaire des exercices	216
Exercices	217
Corrigés	223
9 Fonction de transfert - Diagramme de Bode	231
1 Fonction de transfert	231
2 Diagramme de Bode	233
3 Exemples de filtres	236
Méthodologie	244

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices	251
Exercices	252
Corrigés	256
10 Filtrage d'un signal périodique	261
1 Contenu spectral d'un signal périodique	261
2 Puissance moyenne	264
3 Filtrage	266
4 Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	266
5 Étude du filtrage d'un créneau périodique	267
6 Réponse indicielle et contenu spectral	271
7 Enrichissement du spectre par un système non linéaire	273
8 Mise en cascade de filtres	275
9 Simulation	277
Méthodologie	279
Programme officiel et sommaire des exercices	283
Exercices	284
Corrigés	291
11 Amplificateur linéaire intégré	297
1 Amplificateur linéaire intégré	297
2 Montage à rétroaction négative : l'amplificateur non inverseur	298
3 Les lois de l'ALI	300
4 Exemples de montage	301
Méthodologie	304
Programme officiel et sommaire des exercices	305
Exercices	306
Corrigés	312
ONDES	319
12 Propagation d'un signal	319
1 Exemples de signaux	319
2 Superposition de deux signaux sinusoïdaux de fréquences voisines	320
3 Phénomène de propagation	324
Méthodologie	336
Programme officiel et sommaire des exercices	337
Exercices	338

Corrigés	346
13 Phénomène d'interférences	353
1 Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	353
2 Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence	356
3 Interférences lumineuses avec les trous d'Young	358
Méthodologie	364
Programme officiel et sommaire des exercices	365
Exercices	366
Corrigés	371
14 Ondes stationnaires mécaniques	375
1 Définition et forme d'une onde stationnaire	375
2 Nœuds et ventres de vibration	376
3 Modes propres	377
4 Généralisation	379
5 Lien avec la musique : instruments à cordes	379
Méthodologie	380
Programme officiel et sommaire des exercices	381
Exercices	382
Corrigés	386
MÉCANIQUE	389
15 Cinématique du point	389
1 Notion de point en physique	389
2 Repérage d'un point du plan	390
3 Repérage d'un point dans l'espace	393
4 Cinématique du point	396
5 Utilisation des différents systèmes de coordonnées	400
6 Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	407
7 Mouvements circulaires	409
8 Interprétation du vecteur accélération	411
Méthodologie	414
Programme officiel et sommaire des exercices	416
Exercices	417
Corrigés	421

TABLE DES MATIÈRES

16 Principes de la dynamique newtonienne	427
1 Éléments cinétiques d'un point matériel	427
2 Les trois lois de Newton	429
3 Limite de validité de la mécanique classique	432
4 Classification des forces	433
5 Chute libre dans le champ de pesanteur	442
6 Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	448
7 Le pendule simple	451
Méthodologie	454
Programme officiel et sommaire des exercices	456
Exercices	458
Corrigés	469
17 Approche énergétique de la dynamique du point	487
1 Travail et puissance d'une force	487
2 Premiers exemples de calculs de travaux	489
3 Théorème de l'énergie cinétique	490
4 Énergie potentielle et forces conservatives	492
5 Énergie mécanique	496
Méthodologie	499
Programme officiel et sommaire des exercices	501
Exercices	502
Corrigés	507
18 Mouvement conservatif à une dimension	515
1 Étude qualitative des mouvements et des équilibres	515
2 Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	520
Méthodologie	525
Programme officiel et sommaire des exercices	526
Exercices	527
Corrigés	530
19 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	537
1 Force de Lorentz	537
2 Mouvement dans un champ électrique uniforme	539
3 Mouvement dans un champ magnétique	544
4 Quelques applications de ces mouvements	547
Méthodologie	550

Programme officiel et sommaire des exercices	551
Exercices	552
Corrigés	558
20 Moment cinétique	565
1 Observations préliminaires	565
2 Moment cinétique d'un point matériel	566
3 Moment d'une force	568
4 Loi du moment cinétique pour un point matériel	570
Méthodologie	572
Programme officiel et sommaire des exercices	573
Exercices	574
Corrigés	578
21 Mouvement dans un champ de force centrale - Champs newtoniens	587
1 Force centrale conservative	587
2 Généralités sur les forces centrales conservatives	591
3 Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	594
4 Étude directe de la trajectoire circulaire	598
5 Application aux satellites terrestres	600
Méthodologie	604
Programme officiel et sommaire des exercices	605
Exercices	607
Corrigés	613
22 Cinématique du solide	621
1 Repérage d'un solide	621
2 Mouvement de translation	622
3 Solides en rotation autour d'un axe fixe	623
Méthodologie	626
Programme officiel et sommaire des exercices	627
Exercices	628
Corrigés	629
23 Solide en rotation autour d'un axe fixe	631
1 Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	631
2 Théorème du moment cinétique pour un solide en rotation	634
3 Actions mécaniques s'exerçant sur un solide en rotation	635
4 Pendule de torsion	638

TABLE DES MATIÈRES

5	Pendule pesant	640
6	Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	644
	Méthodologie	648
	Programme officiel et sommaire des exercices	649
	Exercices	651
	Corrigés	658
THERMODYNAMIQUE		667
24	Système thermodynamique à l'équilibre	667
1	Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	667
2	Étude d'un gaz à l'échelle microscopique	670
3	Système thermodynamique, variables d'état	674
4	Équilibre thermodynamique	676
5	Énergie interne, capacité thermique à volume constant	680
6	Étude expérimentale d'un fluide réel	684
7	Corps pur diphasé en équilibre	688
	Méthodologie	697
	Programme officiel et sommaire des exercices	698
	Exercices	700
	Corrigés	705
25	Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	711
1	Transformation thermodynamique	711
2	Travail des forces de pression	715
3	Transfert thermique	721
	Méthodologie, programme officiel et sommaire des exercices	725
	Exercices	726
	Corrigés	728
26	Premier principe - Bilans d'énergie	731
1	Le premier principe de la thermodynamique	731
2	La fonction d'état enthalpie	737
3	Mesures de grandeurs thermodynamiques	743
	Méthodologie	748
	Programme officiel et sommaire des exercices	749
	Exercices	750
	Corrigés	753

27 Deuxième principe - Bilans d'entropie	757
1 Le deuxième principe de la thermodynamique	757
2 Entropie d'un échantillon de corps pur	761
3 Exemples de bilans d'entropie	766
4 Interprétation microscopique de l'entropie	773
Méthodologie	776
Programme officiel et sommaire des exercices	777
Exercices	778
Corrigés	785
28 Machines thermiques	795
1 Machines thermiques dithermes	795
2 Moteur thermique	796
3 Machine frigorifique	799
4 Pompe à chaleur	800
Méthodologie	803
Programme officiel et sommaire des exercices	804
Exercices	805
Corrigés	810
STATIQUE DES FLUIDES	819
29 Statique des fluides dans un référentiel galiléen	819
1 Forces volumiques et surfaciques, pression	819
2 Pression d'un fluide soumis au champ de pesanteur	821
3 Facteur de Boltzmann	826
4 Actions exercées par un fluide au repos sur un solide	827
5 Équation locale de la statique des fluides	832
Méthodologie	834
Programme officiel et sommaire des exercices	835
Exercices	836
Corrigés	840
INDUCTION ET FORCES DE LAPLACE	847
30 Le champ magnétique	847
1 Le champ magnétique	847

TABLE DES MATIÈRES

2	Cartes de champ magnétique	848
3	Invariances d'une distribution de courant	852
4	Propriétés de symétries du champ magnétique	853
5	Moment magnétique	855
	Méthodologie	857
	Programme officiel et sommaire des exercices	858
	Exercices	859
	Corrigés	861
31	Actions d'un champ magnétique	863
1	Densité linéique de force de Laplace	863
2	Résultante et puissance dans le cas d'une translation	864
3	Couple magnétique	866
4	Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	868
	Méthodologie	870
	Programme officiel et sommaire des exercices	871
	Exercices	872
	Corrigés	875
32	Lois de l'induction	879
1	Expériences d'induction électromagnétique	879
2	Loi de Faraday	881
3	Loi de Lenz	884
	Programme officiel et sommaire des exercices	885
33	Circuit fixe dans un champ magnétique variable	887
1	Auto-induction	887
2	Induction mutuelle	890
3	Transformateur de tension	895
	Méthodologie	897
	Programme officiel et sommaire des exercices	900
	Exercices	901
	Corrigés	906
34	Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	911
1	Conversion de puissance mécanique en puissance électrique	911
2	Conversion de puissance électrique en puissance mécanique	918
	Méthodologie	921
	Programme officiel et sommaire des exercices	926

Exercices	927
Corrigés	931

PHYSIQUE QUANTIQUE 939

35 Introduction à la physique quantique	939
1 La dualité onde-particule de la lumière	939
2 La dualité onde-particule de la matière	943
3 Fonction d'onde et probabilités	949
4 L'inégalité de Heisenberg	951
5 Quantification de l'énergie	953
Méthodologie	958
Programme officiel et sommaire des exercices	959
Exercices	960
Corrigés	967

INCERTITUDES 975

36 Mesures et incertitudes	975
Méthodologie	975
Exercices	987
Corrigés	988

Index	989
--------------	------------

Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique



Les phénomènes lumineux peuvent être étudiés grâce à la théorie de l'optique ondulatoire, faisant intervenir la notion d'onde. L'optique géométrique, fondée sur la notion de rayons lumineux présente une autre approche plus simplifiée.

1 Description et propriétés de la lumière

1.1 Nature de la lumière

La question de la nature de la lumière est présente en science depuis plusieurs millénaires. Encore aujourd'hui, notre compréhension de la lumière est loin d'être complète et satisfaisante. Entre le XVII^e, début de la physique moderne, et le début du XIX^e siècle, deux théories *a priori* fondamentalement opposées existaient :

- la théorie corpusculaire, défendue par Newton notamment, où la lumière est représentée par des corpuscules, modélisés par des rayons qui se propagent rectilignement ;
- la théorie ondulatoire, initiée par Hooke et Huygens, selon laquelle la lumière est caractérisée par une onde.

La renommée de Newton, liée à ses travaux sur la gravitation, a permis à la théorie corpusculaire de s'imposer parmi les scientifiques de l'époque. Mais à partir du XIX^e siècle, les nombreuses expériences d'interférences d'Young et les théories sur les ondes de Fresnel et de Maxwell ont finalement imposé la théorie ondulatoire : la lumière est une onde électromagnétique.

Mais l'avènement de la physique quantique a remis en question la nature de la lumière. On explique dans le chapitre *Introduction au monde quantique* que certaines expériences réalisées au début du XX^e siècle, ont conduit à remettre en question la nature ondulatoire de la lumière : la lumière présente à la fois un comportement ondulatoire et un comportement corpusculaire.

1.2 Spectre de la lumière

La lumière fait partie d'un ensemble plus vaste d'ondes appelées ondes électromagnétiques. Les diverses valeurs de l'énergie de rayonnement, dont la fréquence varie théoriquement entre zéro et l'infini, constituent le **spectre électromagnétique**.

Une onde électromagnétique sinusoïdale, c'est-à-dire dont le spectre ne contient qu'une seule fréquence, est appelée **onde monochromatique**.

La lumière est composée d'une infinité d'ondes monochromatiques de fréquence bien définie.

Une onde monochromatique n'a pas de réalité physique : il s'agit d'un modèle théorique. En effet, une onde monochromatique sinusoïdale n'a ni début ni fin, ce qui est physiquement impossible. En revanche, n'importe quelle onde peut se décomposer en une infinité d'ondes monochromatiques.

La lumière est un phénomène ondulatoire et est donc caractérisée par une double périodicité : temporelle et spatiale. Le spectre peut donc soit être représenté en fonction de la fréquence f ou de la longueur d'onde λ . En effet, pour une onde monochromatique qui se propage avec une célérité c , on a la relation : $\lambda = \frac{c}{f}$.

Chaque couleur est associée à une fréquence donnée. Dans la partie suivante, on montre que la longueur d'onde dépend du milieu de propagation contrairement à la fréquence. Il est donc important de spécifier le milieu dès lors que l'on donne le spectre de la lumière en fonction de la longueur d'onde. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs approchées associées à une couleur du spectre :

Couleur	bleu	vert	jaune	rouge
$\lambda_0(\text{nm})$	450 – 500	500 – 550	550 – 600	650 – 800

Les couleurs perçues ne sont pas caractéristiques de la lumière elle-même mais une manifestation de notre œil et de notre cerveau. Les valeurs indiquées ci-dessus sont donc des valeurs approximatives. Par exemple, il est commode d'associer à la couleur rouge toute lumière de longueur d'onde dans le vide comprise entre 620 nm et 780 nm.

La lumière a un spectre constitué de longueurs d'onde dans le vide situées entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge), c'est-à-dire de fréquences entre 4×10^{14} Hz (rouge) et 8×10^{14} Hz (violet).

1.3 Propagation de la lumière

Dès lors que la nature ondulatoire de la lumière est posée, il est nécessaire de spécifier les caractéristiques et le milieu de propagation de cette onde.

La lumière se propage **dans le vide** avec une célérité indépendante de la fréquence et du référentiel d'étude. Depuis la conférence générale des poids et mesure de 1983, la célérité c_0 de la lumière dans le vide est fixée à :

$$c_0 = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Avec une bonne approximation, il faut retenir la valeur approchée suivante :

La lumière se propage dans le vide avec une célérité constante c_0 de valeur

$$c_0 = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Contrairement aux ondes sonores, dans un milieu matériel transparent, la lumière se propage à une célérité c inférieure à c_0 . Afin de quantifier cette diminution, on introduit l'indice optique n du milieu.

L'indice optique (ou indice de réfraction) n est le rapport de la célérité c_0 dans le vide sur la célérité c dans ce milieu :

$$n = \frac{c_0}{c}.$$

On donne dans le tableau ci-dessous quelques ordres de grandeur de l'indice optique :

Milieu :	vide	air	eau	plexiglas	diamant
$n =$	1	1,00029 \simeq 1	1,3	1,5	2,4

On note que :

- par définition, l'indice optique est nécessairement supérieur ou égal à 1 ;
- les valeurs données dans ce tableau sont des valeurs approchées. L'indice optique varie avec les conditions physiques du milieu : pureté, pression, etc ;
- *a priori*, l'indice optique varie aussi en fonction de la fréquence de la lumière. On parle alors de **milieu dispersif**.

La fréquence f de la lumière ne dépend pas du milieu matériel étudié. Par conséquent, la modification de la célérité de la lumière dans un milieu d'indice optique n engendre une modification de la longueur d'onde. Notons λ_0 (respectivement λ_n) la longueur d'onde de la lumière dans le vide (respectivement dans le milieu d'indice optique n). Dans ces deux milieux, $c_0 = \lambda_0 f$ et $c = \lambda_n f$; avec $c = \frac{c_0}{n}$, le rapport des deux relations précédente impose

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}.$$

Dans un milieu d'indice optique n , la longueur d'onde λ_n de la lumière est reliée à celle du vide λ_0 par :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}.$$

2 Les sources lumineuses

2.1 Sources thermique

Tout corps de température non nulle émet un **rayonnement thermique** induit par le mouvement continu et désordonné des particules qui le constitue. Ce rayonnement est caractérisé notamment par un **spectre continu et large**. Le spectre, dont l'allure est représentée ci-dessous pour différentes températures, possède un maximum à une longueur d'onde précise dépendant seulement de la température du corps.

Le corps humain est naturellement à une température d’environ 37 °C (environ 310 K) dont le maximum d’émission se situe pour une longueur d’onde d’environ 9 μm. Le corps rayonne essentiellement dans l’infrarouge : ce rayonnement est invisible pour les yeux.

D’après la figure ci-contre, on remarque que plus la température du corps augmente, plus le maximum se déplace vers les longueurs d’onde faibles. À partir de 1200 K, une partie de ce rayonnement se situe dans le domaine visible et nos yeux le captent. Pour 6000 K, le maximum se situe dans le domaine visible. C’est notamment le cas du Soleil dont la température externe avoisine 6000 K.

Les lampes à incandescence (ou lampes à filament) se fondent sur ce phénomène : on porte un filament de tungstène à une température d’environ 2800 K, placé dans une atmosphère inerte pour ralentir sa vaporisation. Cependant, une grande partie de l’énergie rayonnée par le filament se situe dans l’infrarouge : seulement 5 % de l’électricité fournie à l’ampoule sert à émettre de la lumière visible, d’où leur remplacement par des LED.

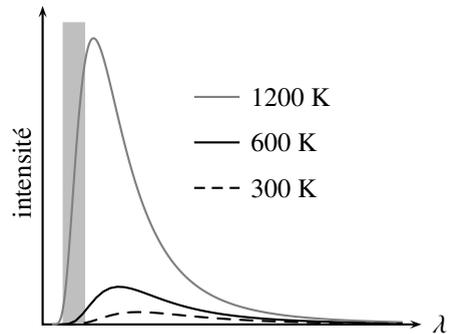


Figure 1.1 – Intensité lumineuse d’un corps chauffé à différentes températures en fonction de la longueur d’onde. La partie grisée représente le spectre de la lumière visible.

Une lampe à incandescence fonctionne à partir du rayonnement thermique émis par un corps chauffé. Le spectre est un spectre d’émission **continu**.

2.2 Sources spectrales

Le fonctionnement d’une lampe spectrale est différente de celle d’une lampe à incandescence : elle ne repose pas sur les mêmes principes physiques.

Dans une lampe spectrale, un gaz est placé dans une ampoule et est soumis à une décharge électrique, c’est-à-dire à un flux d’électrons énergétiques. Cette décharge vient exciter les atomes du gaz, c’est-à-dire augmenter leur énergie.

D’après la théorie quantique, l’énergie d’un atome ne peut prendre que certaines valeurs bien déterminées (dépendantes de l’atome étudié) : on parle de **quantification de l’énergie**. Lorsqu’un atome est excité, ce dernier passe d’un niveau d’énergie à un autre niveau d’énergie plus élevé. Au bout d’un certain temps, l’atome revient à son état fondamental en émettant une onde électromagnétique à une fréquence donnée : le spectre de l’atome est un spectre d’émission **discontinu** (voir figure ci-contre).

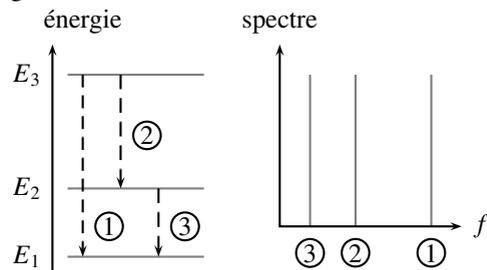


Figure 1.2 – Lien entre les transitions énergétiques et le spectre émis.

Une lampe spectrale émet un rayonnement discontinu constitué de plusieurs fréquences bien précises. Le spectre est **discret** et contient des pics fins appelés **raies spectrales**.

2.3 Sources laser

Une source laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) fonctionne sur les mêmes principes physiques que les lampes spectrales à la différence près où le dispositif fait en sorte de désexciter tous les atomes en même temps.

Le rayonnement émis par les atomes de la source laser est confiné entre deux miroirs. Dans le chapitre *Ondes stationnaires mécaniques*, on montre que la fréquence d'une onde confinée entre deux extrémités ne peut prendre que certaines valeurs : la fréquence est **quantifiée**. Dans une source laser, l'onde effectue alors des allers-retours entre les deux miroirs : le spectre est **discontinu** et ne contient qu'une seule fréquence.

Un faisceau laser présente une unique raie spectrale beaucoup plus fine qu'une raie de lampe spectrale : la lumière laser constitue ainsi la forme la plus proche du modèle de la source lumineuse monochromatique.

Les sources laser sont très directifs et sont des sources de faible puissance lumineuse : quelques milliwatts. Le diamètre du faisceau à la sortie du tube est d'environ 1 mm. L'éclairement reçu sur un écran est d'environ $1 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-1}$. Cependant, le faisceau laser non étalé est dangereux pour l'œil : l'éclairement est sensiblement le même que celui reçu sur Terre par le Soleil mais il est focalisé sur la rétine sur une surface plus petite. Il est nécessaire de prendre des précautions dès que l'on utilise cette source lumineuse.

3 Modèle géométrique de la lumière

3.1 Cadre de l'approximation géométrique

De nombreuses expériences simples d'optique géométrique peuvent être étudiées et expliquées sans faire référence à la nature ondulatoire de la lumière, c'est-à-dire sans évoquer les effets d'interférence et de diffraction. L'optique géométrique est donc en soit une approximation de la théorie ondulatoire. Et comme toute approximation, elle n'est valable que si certaines conditions sont vérifiées.

SI l'on examine d'un peu plus près une expérience de diffraction. Un faisceau laser de longueur d'onde λ arrive sur une fente de largeur a réglable. Lorsque la largeur est « suffisamment grande », une fraction de la lumière incidente traverse la fente pour arriver sur l'écran : la tache observée est plus petite.

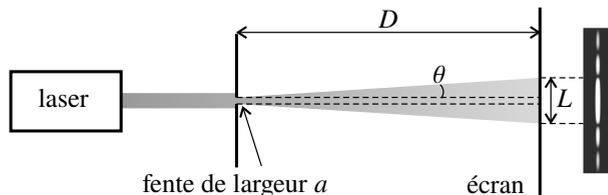


Figure 1.3 – Diffraction d'un faisceau laser par une fente fine.

Cependant, lorsque la largeur a est de l'ordre de quelques longueurs d'onde, la tache s'étale et est constituée de plusieurs fragments (voir figure 1.3).

L’optique géométrique est applicable lorsque les effets ondulatoires peuvent être ignorés, c’est-à-dire lorsque la taille a , caractéristique du milieu de propagation, est très grande devant la longueur d’onde de la lumière. Le critère souvent retenu est

$$a > 1000 \lambda.$$

Pour une longueur d’onde de la lumière visible de l’ordre de 500 nm, l’approximation géométrique est valable si la taille caractéristique du milieu de propagation est supérieure à 0,5 mm.

3.2 Notion de rayon lumineux

L’optique géométrique se construit autour de la notion de rayon lumineux. Cette notion est assez intuitive : il suffit d’imaginer la propagation d’un laser dans l’air pour se convaincre de la présence de rayons qui se propagent en ligne droite sans encombre. La direction de propagation de la lumière laser correspond à la direction de propagation de l’énergie.

L’optique géométrique introduit la notion de **rayons lumineux**, lignes le long desquelles l’onde lumineuse, c’est-à-dire son énergie, se propage.

Dans le cadre de l’approximation géométrique, la propagation d’un rayon lumineux n’est pas affectée par celle des autres.

3.3 Propagation rectiligne

Dans le vide, la lumière se propage **rectilignement** mais ce n’est *a priori* pas le cas dans un milieu matériel quelconque.

Il existe des milieux particuliers où la lumière se propage rectilignement : il s’agit des milieux **homogènes** et **isotropes** :

- milieu homogène : les propriétés sont identiques en tout point de l’espace ;
- milieu isotrope : les propriétés sont indépendantes de la direction de l’espace.

Afin de mieux visualiser ces définitions, prenons l’exemple d’une autoroute. *A priori* sur chaque portion d’autoroute les voitures peuvent choisir de rouler à n’importe quelle vitesse. En chaque point de cette autoroute les propriétés générales sont les mêmes : le milieu est homogène. En revanche, le milieu n’est pas isotrope car les voitures ne peuvent aller que dans deux directions possibles.

La lumière se propage rectilignement dans un milieu homogène.

Lorsque le milieu n’est pas homogène, notamment parce que l’indice optique varie en fonction de la température, la lumière ne se propage plus en ligne droite. Cela explique par exemple les mirages optiques observés dans des milieux où la température varie fortement en fonction de l’altitude (désert, zone glaciaire, etc.).

4 Lois de Snell-Descartes

Lorsqu’il y a un changement brusque de milieu, par exemple entre l’air et l’eau, la lumière **incidente** se sépare en deux parties :

- un rayon **réfléchi** qui se propage dans le même milieu que le rayon incident ;
- un rayon **réfracté** qui se propage dans l’autre milieu.

4.1 Définitions

Par définition,

- la surface entre les deux milieux transparents est appelée **dioptre** ;
- le point de contact entre le rayon incident et le dioptre est appelé **point d'incidence** ;
- la normale au dioptre et le rayon incident forment le **plan d'incidence** ;
- les angles i_1, r, i_2 sont respectivement les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction. **Ces angles sont algébrisés et orientés par rapport à la normale.**

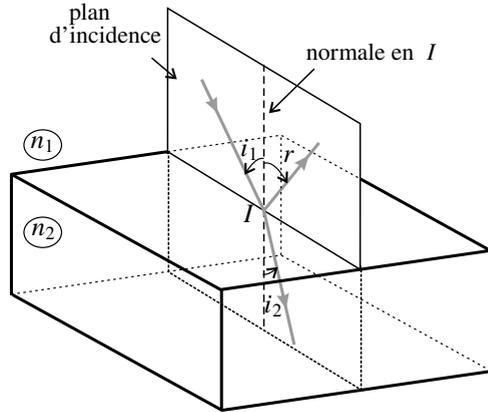


Figure 1.4 – Réflexion et réfraction sur un dioptre.

4.2 Énoncé des lois

On note n_1 l'indice optique du milieu de propagation du rayon incident et n_2 l'indice optique du milieu de propagation du rayon réfracté.

Lois de Descartes :

- les rayons réfléchi et réfracté sont situés dans le plan d'incidence ;
- loi de la réflexion : $i_1 = -r$;
- loi de la réfraction : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

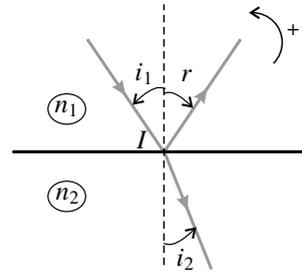


Figure 1.5 – Représentation dans le plan d'incidence.

On prêtera attention à l'algébrisation des angles ! Sur la figure ci-contre : $i_1 > 0, r < 0$ et $i_2 > 0$.

4.3 Détails sur la réfraction

D'après la loi de la réflexion, les rayons incident et réfléchi sont symétriques par rapport à la normale, indépendamment du milieu d'indice n_2 .

D'après la loi de réfraction, l'angle de réfraction peut se calculer : $\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$. Deux cas apparaissent : $n_2 > n_1$ et $n_2 < n_1$:

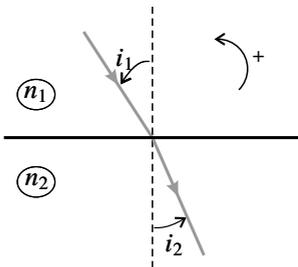


Figure 1.6 – Réfraction avec un milieu (2) plus réfringent.

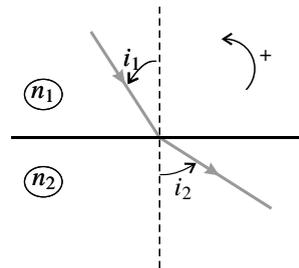


Figure 1.7 – Réfraction avec un milieu (2) moins réfringent.

- pour $n_2 > n_1$, le deuxième milieu est plus réfringent que le premier. On a alors :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 < \sin i_1,$$

c’est-à-dire $i_2 < i_1$: le rayon réfracté se rapproche de la normale (figure 1.6);

- pour $n_1 > n_2$, le deuxième milieu est moins réfringent que le premier. On a alors :

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1 > \sin i_1,$$

c’est-à-dire $i_1 < i_2$: le rayon réfracté s’écarte de la normale (figure 1.7).

4.4 Réflexion totale

Pour un angle d’incidence i_1 donné, compris entre 0 et $\pi/2$, existe-t-il toujours un rayon réfracté ?

Dans le cas $n_1 > n_2$, on représente l’évolution de l’angle de réfraction lorsque l’angle d’incidence augmente :

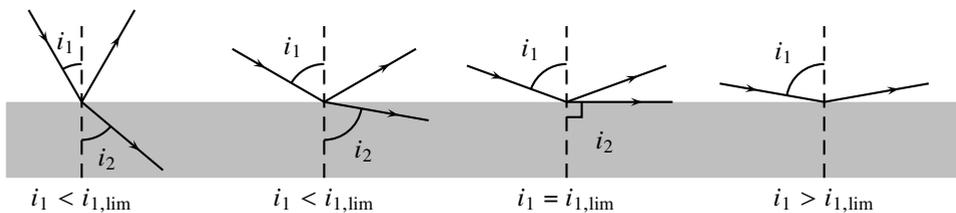


Figure 1.8 – Évolution des rayons en fonction de l’angle d’incidence dans le cas $n_1 > n_2$.

Dans cette situation, la loi de réfraction impose $i_2 > i_1$. L’angle de réfraction peut atteindre la valeur de $\pi/2$ avant i_1 . Cependant, i_2 ne peut pas dépasser cette valeur, de sorte que le rayon réfracté disparaît à partir d’un angle d’incidence limite noté $i_{1,\text{lim}}$. Pour cette situation, la loi de la réfraction s’écrit

$$\sin i_{1,\text{lim}} = \frac{n_2}{n_1} \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) = \frac{n_2}{n_1} < 1.$$

Lorsque $i_1 > i_{1,\text{lim}}$, le rayon réfracté n’existe plus et toute l’intensité du rayon initialement réfracté se transmet au rayon réfléchi : on parle de **réflexion totale**.

Il y a réflexion totale lorsque les deux conditions suivantes sont vérifiées :

- le milieu incident est plus réfringent que le milieu réfracté ($n_2 < n_1$);
- l’angle d’incidence i_1 vérifie l’inégalité $i_1 \geq i_{1,\text{lim}}$ avec :

$$i_{1,\text{lim}} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right).$$

La réflexion totale est utilisée dans le guidage de la lumière par les fibres optiques, étudiée dans le chapitre suivant.

MÉTHODOLOGIE

Comment sont définis les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction ?

▷ *Toujours définis par rapport à la normale au dioptre (et non par rapport au dioptre).*

Y a-t-il toujours réflexion totale ?

▷ *Non. Seulement si l'onde se propage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent.*

Comment établir l'angle de réfraction limite ?

▷ *Écrire la loi de la réfraction et prendre un angle de réfraction de valeur $\frac{\pi}{2}$.*

PROGRAMME OFFICIEL ET SOMMAIRE DES EXERCICES

NOTIONS ET CONTENUS

CAPACITÉS EXIGIBLES

Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Spectre.	Caractériser une source lumineuse par son spectre. Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur. ▶ 1.C3 ▷ 1.3 1.4 1.7
Modèle de l'optique géométrique. Notion de rayon lumineux. Indice d'un milieu transparent.	Définir le modèle de l'optique géométrique. Indiquer les limites du modèle de l'optique géométrique. ▶ 1.C1
Réflexion, réfraction. Lois de Snell-Descartes.	Établir la condition de réflexion totale. ▶ 1.C2 1.C4 ▷ 1.1 1.2 1.5 1.6 1.8

EXERCICES ★ (LE COURS)

1.C1 Approximation géométrique À partir d'un calcul d'ordre de grandeur, déterminer si on peut appliquer les lois de l'optique géométrique dans les cas suivants :

- 1) un faisceau lumineux se propage à l'intérieur d'un objectif d'un téléphone portable ;
- 2) un laser rouge rencontre un cheveu.

1.C2 Lois de Snell-Descartes

Énoncer les lois de Snell-Descartes.

1.C3 Réfraction Un rayon lumineux de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 600 \text{ nm}$ se propage dans l'air d'indice $n_a \simeq 1,0$ et arrive à la séparation avec un milieu constitué d'eau d'indice optique $n_e \simeq 1,3$.

L'onde transmise et l'onde réfléchie ont-elles la même longueur d'onde que l'onde incidente ? De même pour la fréquence ? Ont-elles la même couleur ?

1.C4 Réflexion totale

- 1) Définir la notion de réflexion totale.
- 2) À quelles conditions y a-t-il réflexion totale ? Établir l'expression de l'angle d'incidence limite.

EXERCICES ★★

1.1 Doublage de fréquence

Le rayon laser utilisé à l'observatoire du CERGA pour mesurer la distance Terre-Lune est obtenu par doublage de fréquence à partir d'un laser de longueur d'onde $\lambda_1 = 1,064 \mu\text{m}$.

- 1) Quelle est la longueur d'onde λ_2 de la lumière envoyée vers la Lune ? Quelle est sa couleur ?
- 2) On envoie en fait des impulsions durant $0,1 \text{ ns}$. Calculer le nombre d'oscillations du signal lumineux dans une impulsion.

1.2 Incidence de Brewster

Un rayon lumineux arrive à l'interface plane séparant l'air d'un milieu d'indice n . Il se scinde en un rayon réfléchi et un rayon réfracté.

Trouver l'angle d'incidence i_B , appelé angle de Brewster, pour lequel ces deux rayons sont perpendiculaires entre eux. Faire l'application numérique dans le cas de l'eau d'indice $n = 1,33$, puis d'un verre d'indice $1,5$.

1.3 Absorption de la lumière par l'eau

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur λ traverse une épaisseur L d'eau, la puissance lumineuse est multipliée par le facteur de transmission : $T(\lambda) = \exp(-\alpha(\lambda)L)$, où $\alpha(\lambda)$ est appelé coefficient d'absorption. La figure page suivante représente le coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde pour le spectre visible.