

PHYSIQUE

PTSI

Sous la direction de **Stéphane Cardini**

Damien Jurine | **Bernard Salamito**

Valérie Bouland | Rachel Comte | François Crépin

Luc Gauthier | Tom Morel | Marie-Noëlle Sanz

PHYSIQUE

PTSI

TOUT-EN-UN

3^e édition

DUNOD

Couverture : création Hokus Pokus, adaptation Studio Dunod

Retrouvez nos ouvrages pour les prépas scientifiques ici



<http://dunod.link/prepassc>

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, MPSI et PT et est actuellement en poste en PC au lycée Janson de Sailly, à Paris. Elle est également 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, parfois 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 et 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 rédhibitoire pour un passage en seconde année puis une belle intégration.

Les auteurs remercient tous les collègues et lecteurs qui ont pris 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 vos études 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 **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

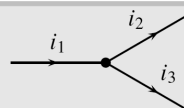
La résistance de sortie R_s d'un générateur de fonction est de l'ordre de $50\ \Omega$. Branché aux bornes d'une résistance de l'ordre du $k\Omega$, donc très supérieure à R_s , il se comporte pratiquement comme un générateur idéal.

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.	Établir et reconnaître l'équation différentielle qui caractérise un oscillateur harmonique ; la résoudre compte tenu des conditions initiales. ► 6.C1 6.C2 Caractériser le mouvement en utilisant les notions d'amplitude, de phase, de période, de fréquence, de pulsation. ► 6.C3 ▷ 6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 Réaliser un bilan énergétique. ► 6.C4 ▷ 6.6 6.7 6.8

**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)
11.C1 Signaux physiques Quelles sont les grandeurs physiques correspondant à un signal acoustique ? à un signal électromagnétique ? à un signal électrique ?

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

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 ns. Calculer le nombre d'oscillations du signal lumineux dans une impulsion.
--

Tous les exercices sont entièrement corrigés.

CORRIGÉS
7.C1 1) C'est la sortie du montage quand l'entrée est nulle pour $t < 0$ et est une constante positive pour $t > 0$. 2) Plus la résistance est importante, plus les pertes Joule 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.

Table des matières

Présentation des auteurs	5
Avant-propos	7
Mode d'emploi	9
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 numérique	65
3	La fibre à saut d'indice	71
	Méthodologie	74
	Programme officiel et sommaire des exercices	76
	Exercices	77
	Corrigés	83
	 SIGNAUX ÉLECTRIQUES	 91
4	Circuits électriques dans l'ARQS	91
1	Intensité du courant électrique	91
2	Circuit électrique	97
3	Tension électrique	98
4	Dipôles électrocinétiques en courant continu	101
5	Associations de dipôles	103
6	Ponts diviseurs	104
7	Résistances de sortie et d'entrée	105
8	Dipôles électrocinétiques fondamentaux du régime variable	106
9	Puissance et énergie en régime variable	108
	Méthodologie	110
	Programme officiel et sommaire des exercices	112
	Exercices	113
	Corrigés	116
5	Circuit linéaire du premier ordre	121
1	Étude expérimentale d'un circuit RC série	121
2	Modélisation	122
3	Régime libre du circuit RC	125
4	Étude de la tension $u_R(t)$	126
5	Exemple de circuit inductif	128
6	Simulation	130
	Méthodologie	132
	Programme officiel et sommaire des exercices	136
	Exercices	137
	Corrigés	143

6	Oscillateur harmonique	151
1	Un oscillateur harmonique mécanique	151
2	Un oscillateur harmonique électrique	155
	Méthodologie	157
	Programme officiel et sommaire des exercices	160
	Exercices	161
	Corrigés	164
7	Circuit linéaire du deuxième ordre	167
1	Étude expérimentale d'un circuit RLC série	167
2	Équation différentielle sur la tension $u_C(t)$	169
3	Détermination de la tension $u_C(t)$	170
4	Durée du régime transitoire	171
5	Réponse à un signal crêteaux	173
6	Bilan énergétique	174
7	Analogie entre un circuit RLC et un oscillateur mécanique	175
	Méthodologie	176
	Programme officiel et sommaire des exercices	178
	Exercices	179
	Corrigés	182
8	Régime sinusoïdal - Résonance	187
1	Régime transitoire et régime sinusoïdal forcé	187
2	Signaux complexes en régime sinusoïdal forcé	189
3	Impédance complexe	192
4	Résonance d'intensité dans un circuit RLC série	195
5	Résonance de charge d'un circuit RLC série	199
	Méthodologie	201
	Programme officiel et sommaire des exercices	204
	Exercices	205
	Corrigés	211
9	Fonction de transfert - Diagramme de Bode	219
1	Fonction de transfert	219
2	Diagramme de Bode	221
3	Exemples de filtres	224
	Méthodologie	232
	Programme officiel et sommaire des exercices	239

TABLE DES MATIÈRES

Exercices	240
Corrigés	244
10 Filtrage d'un signal périodique	251
1 Contenu spectral d'un signal périodique	251
2 Puissance moyenne	254
3 Filtrage	256
4 Réponse d'un filtre à un signal périodique non sinusoïdal	256
5 Étude du filtrage d'un créneau périodique	257
6 Réponse indicielle et contenu spectral	261
7 Enrichissement du spectre par un système non linéaire	263
8 Mise en cascade de filtres	265
9 Simulation	267
Méthodologie	269
Programme officiel et sommaire des exercices	273
Exercices	274
Corrigés	281
 ONDES	 287
11 Propagation d'un signal	287
1 Exemples de signaux	287
2 Phénomène de propagation	288
Méthodologie	300
Programme officiel et sommaire des exercices	301
Exercices	302
Corrigés	308
12 Phénomène d'interférences	313
1 Superposition de deux signaux sinusoïdaux de même fréquence	313
2 Interférence entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence	316
3 Interférences lumineuses avec les trous d'Young	318
Méthodologie	324
Programme officiel et sommaire des exercices	325
Exercices	326
Corrigés	331

MÉCANIQUE 335**13 Cinématique du point 335**

1	Notion de point en physique	335
2	Repérage d'un point du plan	336
3	Repérage d'un point dans l'espace	339
4	Cinématique du point	342
5	Utilisation des différents systèmes de coordonnées	346
6	Études de mouvements en coordonnées cartésiennes	353
7	Mouvements circulaires	355
8	Interprétation du vecteur accélération	357
	Méthodologie	360
	Programme officiel et sommaire des exercices	362
	Exercices	363
	Corrigés	367

14 Principes de la dynamique newtonienne 373

1	Éléments cinétiques d'un point matériel	373
2	Les trois lois de Newton	375
3	Limite de validité de la mécanique classique	378
4	Classification des forces	379
5	Chute libre dans le champ de pesanteur	387
6	Tir d'un projectile dans le champ de pesanteur	393
7	Le pendule simple	397
	Méthodologie	399
	Programme officiel et sommaire des exercices	401
	Exercices	402
	Corrigés	413

15 Approche énergétique de la dynamique du point 431

1	Travail et puissance d'une force	431
2	Premiers exemples de calculs de travaux	433
3	Théorème de l'énergie cinétique	434
4	Énergie potentielle et forces conservatives	436
5	Énergie mécanique	440
	Méthodologie	443
	Programme officiel et sommaire des exercices	445
	Exercices	446

TABLE DES MATIÈRES

Corrigés	451
16 Mouvement conservatif à une dimension	459
1 Étude qualitative des mouvements et des équilibres	459
2 Mouvement conservatif dans un puits de potentiel	464
Méthodologie	469
Programme officiel et sommaire des exercices	470
Exercices	471
Corrigés	474
17 Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique	481
1 Force de Lorentz	481
2 Mouvement dans un champ électrique uniforme	483
3 Mouvement dans un champ magnétique	488
4 Quelques applications de ces mouvements	491
Méthodologie	494
Programme officiel et sommaire des exercices	495
Exercices	496
Corrigés	502
18 Moment cinétique	509
1 Observations préliminaires	509
2 Moment cinétique d'un point matériel	510
3 Moment d'une force	512
4 Loi du moment cinétique pour un point matériel	514
Méthodologie	516
Programme officiel et sommaire des exercices	517
Exercices	518
Corrigés	522
19 Mouvement dans un champ de force centrale - Champs newtoniens	531
1 Force centrale conservative	531
2 Généralités sur les forces centrales conservatives	535
3 Cas particulier de l'attraction gravitationnelle	538
4 Étude directe de la trajectoire circulaire	542
5 Application aux satellites terrestres	544
Méthodologie	547
Programme officiel et sommaire des exercices	548
Exercices	550

Corrigés	556
20 Cinématique du solide	565
1 Repérage d'un solide	565
2 Mouvement de translation	566
3 Solides en rotation autour d'un axe fixe	567
Méthodologie	570
Programme officiel et sommaire des exercices	571
Exercices	572
Corrigés	573
21 Solide en rotation autour d'un axe fixe	575
1 Moment cinétique d'un solide ou d'un système de points	575
2 Théorème du moment cinétique pour un solide en rotation	578
3 Actions mécaniques s'exerçant sur un solide en rotation	579
4 Pendule pesant	582
5 Énergie d'un solide en rotation autour d'un axe fixe	587
Méthodologie	591
Programme officiel et sommaire des exercices	592
Exercices	594
Corrigés	599
THERMODYNAMIQUE	607
22 Système thermodynamique à l'équilibre	607
1 Descriptions microscopique et macroscopique de la matière	607
2 Étude d'un gaz à l'échelle microscopique	610
3 Système thermodynamique, variables d'état	612
4 Équilibre thermodynamique	614
5 Énergie interne, capacité thermique à volume constant	618
6 Étude expérimentale d'un fluide réel	622
7 Corps pur diphasé en équilibre	626
Méthodologie	635
Programme officiel et sommaire des exercices	636
Exercices	638
Corrigés	641

TABLE DES MATIÈRES

23 Énergie échangée par un système au cours d'une transformation	645
1 Transformation thermodynamique	645
2 Travail des forces de pression	649
3 Transfert thermique	655
Méthodologie, programme officiel et sommaire des exercices	659
Exercices	660
Corrigés	662
24 Premier principe - Bilans d'énergie	665
1 Le premier principe de la thermodynamique	665
2 La fonction d'état enthalpie	671
3 Mesures de grandeurs thermodynamiques	677
Méthodologie	682
Programme officiel et sommaire des exercices	683
Exercices	684
Corrigés	687
25 Deuxième principe - Bilans d'entropie	691
1 Le deuxième principe de la thermodynamique	691
2 Entropie d'un échantillon de corps pur	695
3 Exemples de bilans d'entropie	700
4 Interprétation microscopique de l'entropie	707
Méthodologie	709
Programme officiel et sommaire des exercices	710
Exercices	711
Corrigés	718
26 Machines thermiques	729
1 Machines thermiques dithermes	729
2 Moteur thermique	730
3 Machine frigorifique	733
4 Pompe à chaleur	734
Méthodologie	737
Programme officiel et sommaire des exercices	738
Exercices	739
Corrigés	744

INDUCTION ET FORCES DE LAPLACE	753
27 Champ et moment magnétiques	753
1 Le champ magnétique	753
2 Cartes de champ magnétique	754
3 Invariances d'une distribution de courant	758
4 Propriétés de symétries du champ magnétique	759
5 Moment magnétique	761
Méthodologie	763
Programme officiel et sommaire des exercices	764
Exercices	765
Corrigés	767
28 Actions d'un champ magnétique	769
1 Densité linéique de force de Laplace	769
2 Résultante et puissance dans le cas d'une translation	770
3 Couple magnétique	772
4 Action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant	774
Méthodologie	776
Programme officiel et sommaire des exercices	777
Exercices	778
Corrigés	781
29 Lois de l'induction	785
1 Expériences d'induction électromagnétique	785
2 Loi de Faraday	787
3 Loi de Lenz	790
Méthodologie et programme officiel	791
30 Circuit fixe dans un champ magnétique variable	793
1 Auto-induction	793
2 Induction mutuelle	796
3 Transformateur de tension	801
Méthodologie	803
Programme officiel et sommaire des exercices	806
Exercices	807
Corrigés	812

TABLE DES MATIÈRES

31 Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire	817
1 Conversion de puissance mécanique en puissance électrique	817
2 Conversion de puissance électrique en puissance mécanique	824
Méthodologie	827
Programme officiel et sommaire des exercices	832
Exercices	833
Corrigés	837
 INCERTITUDES	 847
32 Mesures et incertitudes	847
Méthodologie	847
Exercices	859
Corrigés	860
 Index	 861

Sources lumineuses, modèle de l'optique géométrique

1

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 sciences, depuis plusieurs millénaires. Encore aujourd'hui, notre compréhension de la lumière est loin d'être complète et satisfaisante. Entre le XVII^e siècle, début de la physique moderne, et le début du XIX^e, 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. 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 être représenté en fonction soit de la fréquence f , soit 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 sont 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 précédentes 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 thermiques

Tout corps de température non nulle émet un **rayonnement thermique** induit par le mouvement continu et désordonné des particules qui le constituent. 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 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (environ 310 K) dont le maximum d'émission se situe pour une longueur d'onde d'environ $9\text{ }\mu\text{m}$. 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.

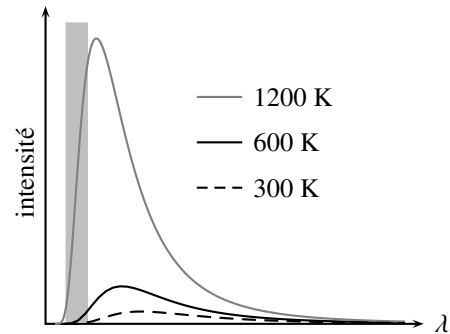


Figure 1.1 – Intensité lumineuse d'un corps chauffé à différentes températures en fonction de la longueur d'onde. La partie grisée représente le spectre de la lumière visible.

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 différent de celui d'une lampe à incandescence : il 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).

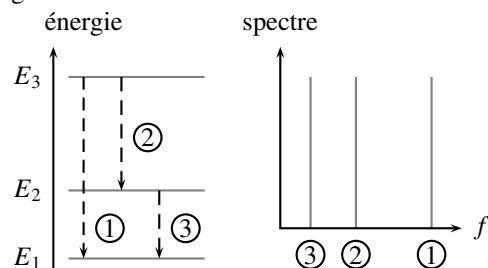


Figure 1.2 – Lien entre les transitions énergétiques et le spectre émis.

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 que 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 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 directives 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.

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).

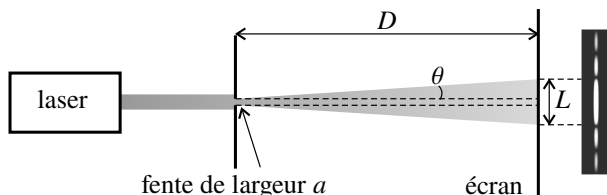


Figure 1.3 – Diffraction d'un faisceau laser par une fente fine.

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.**

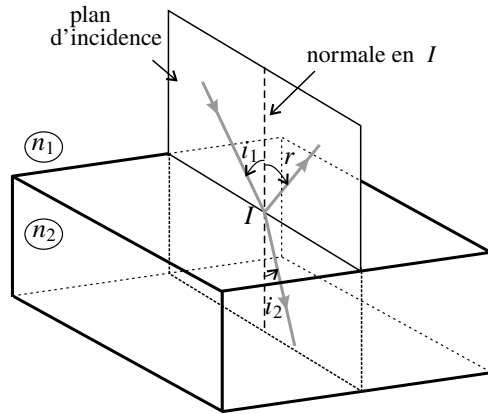


Figure 1.4 – Réflexion et réfraction sur un dioptre.

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 : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$.

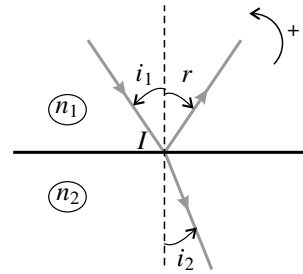


Figure 1.5 – Représentation dans le plan d'incidence.

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, indépendants 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 $n_2 < n_1$:

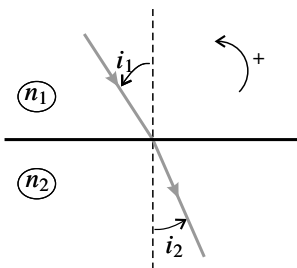


Figure 1.6 – Réfraction avec un milieu (2) plus réfringent.

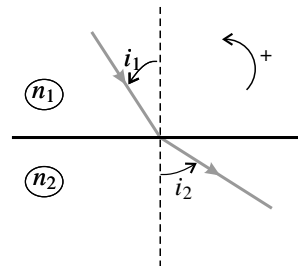


Figure 1.7 – Réfraction avec un milieu (2) moins réfringent.

- 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 :

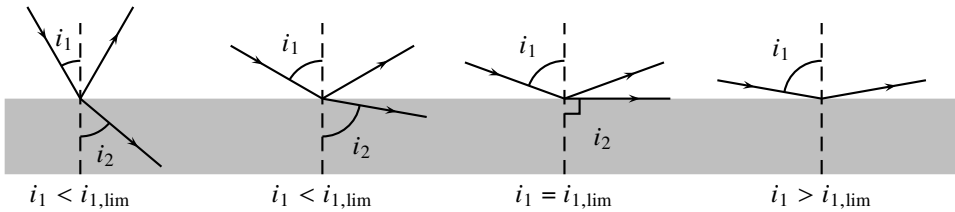


Figure 1.8 – Évolution des rayons en fonction de l'angle d'incidence dans le cas $n_1 > n_2$.

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 de 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 optique $n_a \simeq 1,0$ et arrive à la séparation avec un milieu constitué d'eau d'indice $n_e \simeq 1,3$.

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.

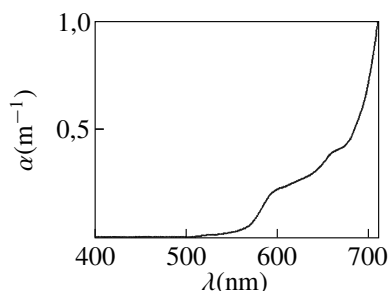
Trouver l'angle d'incidence i_B , appelé angle de Brewster, pour lequel ces deux rayons sont perpendiculaires entre eux. Faire l'application numérique dans le cas de l'eau d'indice $n = 1,33$, puis d'un verre d'indice $1,5$.

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.

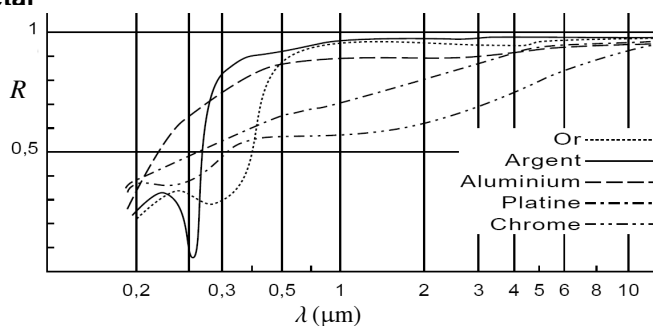
1) Quelle est d'après cette courbe la couleur de la radiation la plus absorbée par l'eau ? Pour cette radiation, quel est le facteur de transmission lorsque l'épaisseur traversée vaut 10 cm ? 2 m ? Quel est le facteur de transmission pour la longueur d'onde la moins absorbée ?

2) Un poisson rouge et blanc est photographié sous l'eau, à quelques mètres de profondeur. Quelles sont les couleurs du poisson sur la photo si elle a été prise sans flash ? avec flash ?



1.4 Réflectivité d'un métal

Lorsqu'une lumière monochromatique de longueur d'onde λ est réfléchi par un métal, la puissance lumineuse est multipliée par $R(\lambda)$. La figure ci-contre compare les coefficients de réflexion $R(\lambda)$ de divers métaux en fonction de la longueur d'onde.



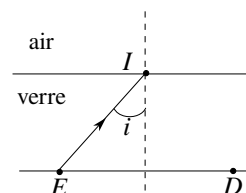
1) Quel est le métal qui vous semble le plus adapté à la réalisation d'un bon miroir dans le domaine visible ? Estimer son coefficient de réflexion sur l'ensemble du visible.

2) Interpréter la couleur d'un miroir obtenu par dépôt d'une couche d'or.

EXERCICES ★★★

1.5 Détection de pluie sur un pare-brise

On modélise un pare-brise par une lame de verre à faces parallèles, d'épaisseur $e = 5$ mm, d'indice $n_v = 1,5$. Un fin pinceau lumineux issu d'un émetteur situé en E arrive de l'intérieur du verre sur le dioptré verre/air en I avec un angle d'incidence $i = 60^\circ$.



1) Montrer que le flux lumineux revient intégralement sur le détecteur situé en D et déterminer la distance ED .

2) Lorsqu'il pleut, une lame d'eau d'indice $n_e = 1,33$ et d'épaisseur $e' = 1$ mm se dépose sur le pare-brise. Représenter le rayon lumineux dans ce cas. À quelle distance du détecteur arrive-t-il ?

1.6 Erreur sur le positionnement d'un objet

Un observateur de taille $t = 1,8$ m regarde un objet au fond d'un bassin depuis le bord. Le bassin de hauteur $h = 1,5$ m contient une épaisseur $e = 1,0$ m d'eau (indice $n = 1,33$). L'objet semble situé à une distance $d = 1$ m du bord. Déterminer la véritable position de l'objet.

1.7 Décalage vers le rouge

Soit un détecteur D fixe en un point O de l'espace, une source S se déplace à la vitesse algébrique V sur un axe (Ox) orienté du détecteur vers la source. L'abscisse $x(t)$ représente la distance entre D et S . La source S émet un signal de période T ; la célérité du signal dans le milieu qui sépare S de D est c .

- 1) Soient t (respectivement t') et $t + T$ (respectivement $t' + T'$) les instants correspondant à l'émission par la source (respectivement la réception par le détecteur) du début et de la fin d'une période du signal. Calculer t' et $t' + T'$ en fonction des données.
- 2) Si on suppose que le temps caractéristique de variation de la vitesse de la source est très grand devant T , exprimer T' en fonction de T , V et c . Dans le cas où $V \ll c$, exprimer ν' la fréquence mesurée par le détecteur en fonction de la fréquence émise ν , de V et de c .
- 3) On constate que le spectre de la lumière reçue des étoiles est décalé vers le rouge par rapport à celui que l'on obtiendrait sur Terre avec une source composée d'atomes identiques à ceux constituant les étoiles observées. Quelle information peut-on en déduire ?

EXERCICES ★★★★★**1.8 Dispersion de la lumière solaire lors d'un arc-en-ciel**

Un milieu dispersif est un milieu dont l'indice optique dépend de la longueur d'onde de la lumière. Dans ce problème on s'intéresse à une conséquence du caractère dispersif de l'eau : le phénomène d'arc-en-ciel. L'indice optique de l'eau est donné par la loi de Cauchy : $n = a + \frac{b}{\lambda^2}$, où a et b sont des constantes positives caractéristiques du milieu et λ la longueur d'onde.

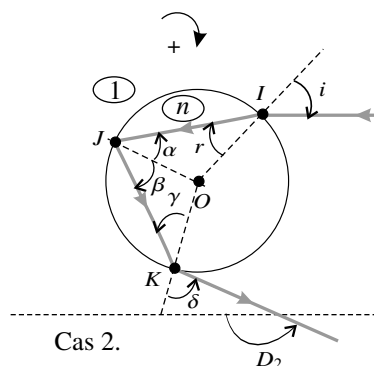
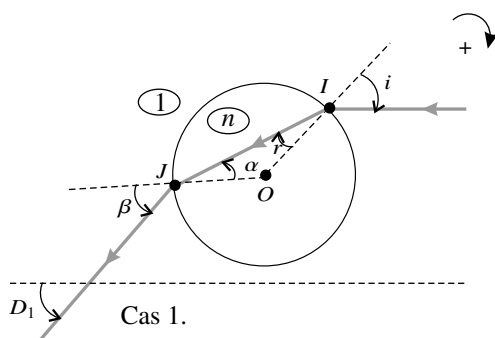
- 1) Rappeler les lois de Descartes pour la réfraction d'un rayon lumineux passant de l'air (milieu d'indice unité) vers un milieu d'indice n . On fera un schéma en notant i l'angle d'incidence et r l'angle de réfraction. Exprimer la dérivée $\frac{dr}{di}$ exclusivement en fonction de l'indice n et du sinus ($\sin i$) de l'angle d'incidence.
- 2) Exprimer, en fonction de i et de r , la valeur de la déviation du rayon lumineux, définie par l'angle entre la direction incidente et la direction émergente, orientées dans le sens de propagation.
- 3) Exprimer aussi, à l'appui d'un schéma, la déviation d'un rayon lumineux dans le cas d'une réflexion.
- 4) Lorsque le soleil illumine un rideau de pluie, on peut admettre que chaque goutte d'eau se comporte comme une sphère recevant un faisceau de rayons parallèles entre eux. Dans tout ce qui suit, on considérera que l'observation est faite par un œil accommodant à l'infini, c'est-à-dire assimilable à une lentille convergente (cristallin) capable de focaliser sur un écran (rétine) tout faisceau de lumière parallèle issu d'une goutte d'eau. On recherche, dans un premier temps, les conditions pour que la lumière émergente, issue d'une goutte d'eau, se présente sous forme d'un faisceau de lumière parallèle. Pour cela on fait intervenir l'angle de déviation D de la lumière à travers la goutte d'eau, mesuré entre le rayon émergent et le rayon incident. Cet angle de déviation D est une fonction de l'angle d'incidence i .

Exprimer la condition de parallélisme des rayons émergents en la traduisant mathématiquement au moyen de la dérivée $\frac{dD}{di}$.

Une goutte d'eau quelconque, représentée par une sphère de centre O , est atteinte sous des incidences i variables comprises entre 0° et 90° . Son indice, pour une radiation donnée, sera noté n tandis que celui de l'air sera pris égal à l'unité.

On considère les trois cas représentés sur la figure ci-dessous :

1. lumière directement transmise ;
2. lumière transmise après une réflexion partielle à l'intérieur de la goutte ;
3. lumière transmise après deux réflexions partielles à l'intérieur de la goutte.



5) Pour le cas 1 :

a. Exprimer, en fonction de l'angle d'incidence i ou de l'angle de réfraction r , tous les angles marqués de lettres grecques.

b. En déduire l'angle de déviation D propre à chaque cas, en fonction de i et de r .

c. Rechercher ensuite, si elle existe, une condition d'émergence d'un faisceau parallèle, exprimée par une relation entre le sinus ($\sin i$) de l'angle d'incidence et l'indice n de l'eau.

6) Mêmes questions dans le cas 2.

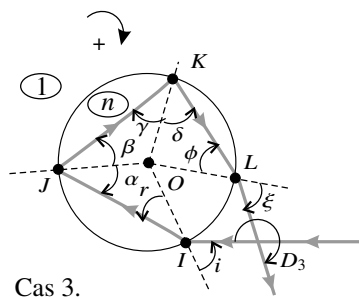
7) Mêmes questions dans le cas 3.

8) Le Soleil étant supposé très bas sur l'horizon, normal au dos d'un observateur, montrer que celui-ci ne pourra observer la lumière transmise que si la goutte d'eau se trouve sur deux cônes d'axes confondus avec la direction solaire et de demi-angles au sommet $\theta_2 = 180^\circ + D_2 = 180^\circ - |D_2|$ (justification de l'arc primaire) et $\theta_3 = D_3 - 180^\circ$ (justification de l'arc secondaire).

9) Les angles θ_2 et θ_3 dépendant de l'indice n de l'eau, on observe un phénomène d'irisation dû au fait que cet indice évolue en fonction de la longueur d'onde.

Calculer ces angles pour le rouge et le violet, sachant que pour le rouge l'indice vaut 1,3317 tandis que pour le violet il est égal à 1,3448.

En admettant que l'observateur se trouve face à un rideau de pluie, dessiner la figure qui apparaît dans son plan d'observation en notant la position respective des rouges et des violets.



CORRIGÉS

- 1.C1** 1) $\lambda \simeq 500 \text{ nm}$ et $d \simeq 1 \text{ mm}$: $\frac{d}{\lambda} \simeq 2000$. On peut utiliser l'optique géométrique.
 2) $\lambda \simeq 600 \text{ nm}$ et $d \simeq 50 \mu\text{m}$: $\frac{d}{\lambda} \simeq 80$. On ne peut pas utiliser l'optique géométrique.

1.C2 Cf. p. 27.

1.C3 Même fréquence, et donc même couleur, mais pas même longueur d'onde, cf. p. 23.

1.C4 1) Cf. p. 28. 2) Cf. p. 28.

1.1 Doublage de fréquence

1) La relation entre la longueur d'onde λ et la fréquence f est $\lambda = \frac{c}{f}$ où c est la vitesse de la lumière. Si la fréquence est doublée, la longueur d'onde est divisée par deux. Donc : $\lambda_2 = \frac{1}{2}\lambda_1 = 532 \text{ nm}$. Cette longueur d'onde correspond à une couleur verte.

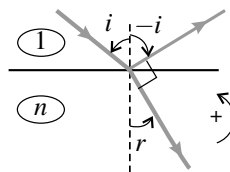
2) La période de l'onde est $T_2 = \frac{\lambda_2}{c} = 1,77 \cdot 10^{-15} \text{ s}$. Le nombre d'oscillations dans une impulsion durant $\tau = 0,1 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ est $\frac{\tau}{T_2} \simeq 6 \cdot 10^4$.

1.2 Incidence de Brewster

D'après la figure, $r + \frac{\pi}{2} + i = \pi$, soit $r = \frac{\pi}{2} - i$. La loi de la réflexion, $\sin i = n \sin r$, impose $\sin i = n \cos i$, soit $\tan i = n$.

L'angle d'incidence de Brewster est : $i_B = \arctan(n)$.

Pour l'eau $i_{B,\text{eau}} = 53^\circ$ et pour le verre $i_{B,\text{verre}} = 56^\circ$.



1.3 Absorption de la lumière par l'eau

1) L'absorption est d'autant plus forte que $\alpha(\lambda)$ est grand. Les longueurs d'onde les plus absorbées par l'eau sont au-dessus de 600 nm et correspondent à la couleur rouge.

Pour $\lambda_1 \simeq 710 \text{ nm}$ (plus grande longueur d'onde sur le graphe), $\alpha(\lambda_1) \simeq 1 \text{ m}^{-1}$. Pour une épaisseur d'eau traversée de 10 cm, $T(\lambda_1) \simeq \exp(-0,1) = 0,90$ et pour une épaisseur de 2 m, $T(\lambda_1) \simeq \exp(-2) = 0,14$.

Pour les longueurs d'onde les plus faibles (couleur bleue), l'eau n'absorbe pas : $\alpha(\lambda) \simeq 0$ $T(\lambda) \simeq 1$.

2) Les parties rouges du poisson réfléchissent dans le rouge. Mais à quelques mètres de profondeur la lumière du soleil est fortement appauvrie en rouge, elles apparaîtront donc noires sur la photo. Les parties blanches réfléchissent tout le spectre, elles apparaîtront vertes (couleur complémentaire du rouge absent de la lumière reçue par le poisson). Ainsi, le poisson sera noir et vert sur la photo en lumière solaire.

Si on utilise un flash, on éclaire le poisson avec un spectre complet (on peut négliger l'absorption par la dizaine de centimètres d'eau entre l'appareil et le poisson) et le poisson aura ses véritables couleurs sur la photo.

1.4 Réflectivité d'un métal

1) Le meilleur métal pour faire un miroir est l'argent car il a le plus fort pouvoir réflecteur et ce pouvoir réflecteur est assez uniforme sur le spectre visible. Le coefficient de réflexion moyen est environ de 0,9.

2) L'or ne réfléchit pas bien les longueurs d'onde les plus petites du spectre visible (entre 400 et 450 nm). Il réfléchit donc peu la lumière bleue, ce qui explique sa couleur jaune (couleur complémentaire du bleu).

1.5 Détection de pluie sur un pare-brise

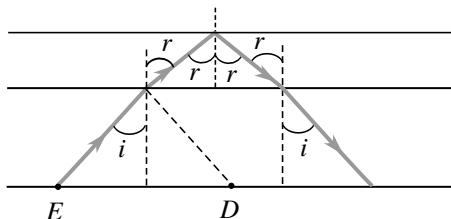
1) Il peut y avoir réflexion totale en I , car le rayon passe du verre à l'air qui est moins réfringent. On calcule l'angle de réfraction limite en I : $R_{\text{lim},v} = \arcsin \frac{1}{n_v} = 41,8^\circ$ (on a pris 1 pour l'indice de l'air). Il y a réflexion totale en I si $i > R_{\text{lim},v}$, ce qui est le cas pour $i = 60^\circ$. Le flux lumineux est donc entièrement réfléchi.

Pour trouver la position du détecteur, on applique la loi de réflexion en I : le rayon est réfléchi symétriquement par rapport à la normale. La distance entre l'émetteur E et le détecteur D doit donc être : $ED = 2e \tan i = 1,7 \text{ cm}$.

2) Les deux dioptres sont maintenant verre-eau et eau-air. Dans les deux cas, il peut y avoir réflexion totale. On calcule les deux angles de réfraction limite : pour le dioptre verre-eau, $n_v \sin R_{\text{lim},1} = n_e \sin \pi/2$, soit $R_{\text{lim},1} = 62,5^\circ$, et pour le dioptre eau-air : $n_e \sin R_{\text{lim},2} = \sin \pi/2$, soit $R_{\text{lim},2} = 48,75^\circ$.

L'angle i est inférieur à $R_{\text{lim},1}$, il y a donc réfraction sur le premier dioptre. On calcule l'angle r après réfraction : $n_v \sin i = n_e \sin r$ donc $r = 77,6^\circ$.

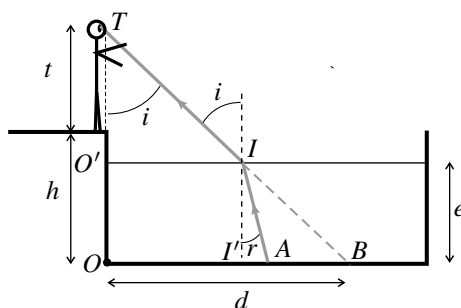
L'angle r est aussi l'angle d'incidence sur le deuxième dioptre, il y a donc réflexion totale sur ce dioptre puisque $r > R_{\text{lim},2}$. On obtient la marche du rayon lumineux représenté sur la figure. On constate que le rayon lumineux ne tombe plus sur le détecteur mais à distance $2e' \tan r = 0,9 \text{ cm}$ de celui-ci. Un système de commande relié au détecteur peut alors déclencher les essuie-glaces.



1.6 Erreur sur le positionnement d'un objet

L'observateur a l'impression que l'objet est dans la direction du rayon qu'il reçoit. On voit sur la figure que le rayon provenant de l'objet s'est éloigné de la normale au dioptre (air-eau) puisque $n > 1$. On note A la position réelle de l'objet et B sa position apparente ; puis :

- dans le triangle TOB : $d = OB = (h + t) \tan i$ d'où $i = 16,9^\circ$;
- dans le triangle $TO'I$: $O'I = (h - e + t) \tan i$;
- dans le triangle $II'A$: $AI' = e \tan r$;
- loi de Descartes en I : $\sin i = n \sin r$.



D'autre part, les angles sont inférieurs à $\frac{\pi}{2}$ donc : $\cos r = \sqrt{1 - \sin^2 r} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}$. On en déduit que : $OA = O'I + I'A = e \tan r + (h - e + t) \tan i$ donc :

$$OA = e \frac{\sin i}{n} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}} + (h - e + t) \tan i = 0,92 \text{ m.}$$

1.7 Décalage vers le rouge

1) Le signal de début de période, émis à l'instant t , doit parcourir jusqu'au détecteur la distance $x(t)$; il est donc reçu à l'instant : $t' = t + \frac{x(t)}{c}$. Le signal de fin de période, émis à l'instant $t + T$, doit parcourir jusqu'au détecteur la distance $x(t + T)$; il est donc reçu à l'instant : $t' + T' = t + T + \frac{x(t+T)}{c}$.

2) Si la vitesse V de la source varie peu entre les instants t et $t + T$, on a : $x(t + T) \simeq x(t) + VT$. On a alors : $T' = \left(t + T + \frac{x(t+T)}{c}\right) - \left(t + \frac{x(t)}{c}\right) = T + \frac{1}{c}(x(t + T) - x(t)) \simeq \left(1 + \frac{V}{c}\right) T$.

On en déduit la fréquence f' mesurée par le détecteur :

$$f' = \frac{1}{T'} = \left(1 + \frac{V}{c}\right)^{-1} \frac{1}{T} = \left(1 + \frac{V}{c}\right)^{-1} f \simeq \left(1 - \frac{V}{c}\right) f,$$

en faisant l'approximation $(1 + \varepsilon)^{-1} \simeq 1 - \varepsilon$ pour $\varepsilon = \frac{V}{c} \ll 1$. Ce changement de fréquence est une manifestation de l'effet Doppler.

3) Le décalage vers le rouge, nommé *redshift* en anglais, correspond à une augmentation des longueurs d'onde, par l'effet Doppler, donc à une diminution des fréquences. Le calcul précédent montre que c'est ce qui se passe si la distance entre la source et le détecteur augmente au cours du temps. On peut donc déduire de cette observation que les étoiles lointaines s'éloignent de nous, phénomène dû à l'expansion de l'Univers.

1.8 Dispersion de la lumière solaire lors d'un arc-en-ciel

1) Loi de Descartes pour la réfraction : le rayon réfracté appartient au plan d'incidence et $\sin i = n \sin r$. On dérive cette loi par rapport à i sachant que n est indépendant de i :

$$\cos i = n \cos r \frac{dr}{di} \Rightarrow \frac{dr}{di} = \frac{1}{n} \frac{\cos i}{\cos r}.$$

Les angles sont dans l'intervalle $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$, donc le cosinus est positif; on peut utiliser la

formule $\cos = \sqrt{1 - \sin^2}$ pour trouver : $\frac{dr}{di} = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \sin^2 r}} = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}}.$

2) La déviation est l'angle dont a tourné le rayon lumineux par rapport à la direction incidente. Dans le cas de la réfraction (figure ci-dessous, à gauche), la déviation D est égale à $r - i$.

3) Dans le cas de la réflexion (figure page suivante à droite), la déviation vaut $D = \pi - 2i$.

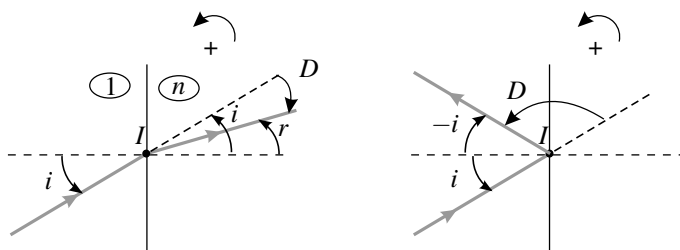
4) Les rayons émergents sont parallèles quel que soit l'angle d'incidence i si la déviation D est indépendante de i , soit $\frac{dD}{di} = 0$.

5) a. Le triangle OIJ est isocèle, donc $\alpha = -r$. Dans ce cas, la loi de Descartes en J s'écrit $\sin \beta = n \sin(-r) = -n \sin r = -\sin i$ donc $\beta = -i$.

b. La déviation en I est $D = r - i$, et celle en J est $D' = \beta - \alpha = r - i$, soit globalement : $D_1 = D + D' = 2(r - i)$.

c. On calcule la dérivée de D_1 par rapport à i : $\frac{dD_1}{di} = 2 \frac{dr}{di} - 2 = 2 \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}} - 2$.

La dérivée est nulle si $\sqrt{1 - \sin^2 i} = n \sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}$. En élevant au carré et en simplifiant, on trouve $n = 1$, ce qui n'a pas d'intérêt. Dans ce cas, il n'est pas possible d'avoir des rayons émergents parallèles.



6) a. L'application de la loi de Descartes pour la réflexion en J donne $\beta = -\alpha$. D'autre part, les triangles OIJ et OKJ sont isocèles donc $r = \beta = -\alpha = -\gamma$. Alors, l'application de la loi de Descartes en K donne $\sin \delta = n \sin \gamma = -n \sin r = -\sin i$, soit $\delta = -i$.

b. Pour la déviation, on a la somme de trois termes : la déviation en I , $D = r - i$; la déviation en J , $D' = \pi - 2\alpha = \pi + 2r$; la déviation en K , $D'' = \delta - \gamma = -i + r$. Donc : $D_2 = D + D' + D'' = \pi + 4r - 2i$.

c. On dérive D_2 : $\frac{dD_2}{di} = 4 \frac{dr}{di} - 2 = 4 \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}} - 2$. Cette dérivée

s'annule si : $\sin^2 i = \frac{4 - n^2}{3}$.

7) a. De manière analogue : $r = \beta = \delta = -\alpha = -\gamma = -\phi$ et $\xi = -i$.

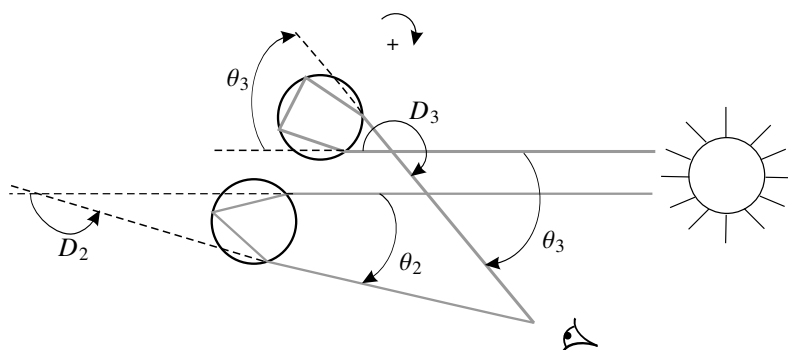
b. $D_3 = (r - i) + (\pi - 2\alpha) + (\pi - 2\gamma) + \xi - \phi = (r - i) + (\pi + 2r) + (\pi + 2r) + (-i + r)$, soit : $D_3 = 2\pi + 6r - 2i$.

c. On dérive D_3 : $\frac{dD_3}{di} = 6 \frac{dr}{di} - 2 = 6 \frac{1}{n} \frac{\sqrt{1 - \sin^2 i}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{n}\right)^2}} - 2$. Cette dérivée s'annule si :

$\sin^2 i = \frac{9 - n^2}{8}$.

8) Le Soleil étant très bas sur l'horizon, on peut supposer que les rayons incidents sont horizontaux. La figure ci-dessous représente les deux cas possibles. Les angles θ_2 et θ_3 entre les rayons incidents pour l'œil et les rayons provenant du Soleil valent :

$$\begin{cases} \theta_2 = \pi + D_2 = \pi - |D_2| \\ \theta_3 = D_3 - \pi. \end{cases}$$



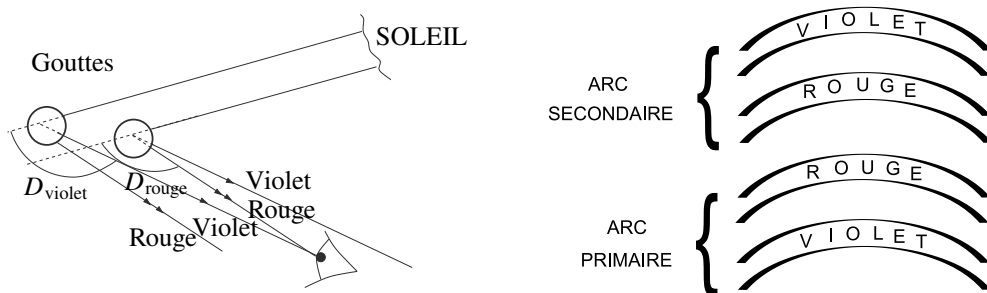
9) Pour l'arc primaire, on calcule i avec la relation $\sin^2 i = \frac{4-n^2}{3}$, on en déduit r avec la loi de Descartes puis D_2 avec la relation $D_2 = D + D' + D'' = \pi + 4r - 2i$. On procède de même pour D_3 avec les relations $\sin^2 i = \frac{9-n^2}{8}$ et $D_3 = 2\pi + 6r - 2i$.

	i	r	$ D_2 $	$\theta_2(\text{rad})$	$\theta_2(^{\circ})$
rouge	1,0382	0,7035	2,4039	0,7377	42,2675
violet	1,0250	0,6887	2,4366	0,7050	40,3927
	i	r	D_3	θ_3	$\theta_3(^{\circ})$
rouge	1,2546	0,7948	4,0238	0,8823	50,5494
violet	1,2473	0,7825	4,0830	0,9414	53,9363

L'angle θ_2 est plus grand pour le rouge que pour le violet. Les rayons rouges observés par l'œil proviennent donc de gouttes de plus haute altitude, car dans ce cas les rayons violets « passent au-dessus de l'œil », et ce sont les rayons violets des gouttes de plus basse altitude qui entrent dans l'œil. On voit donc le violet en dessous du rouge pour l'arc primaire.

En ce qui concerne l'arc secondaire, il n'est pas toujours visible car beaucoup moins intense (il y a deux réflexions dans la goutte). On remarque que $\theta_3 > \theta_2$, donc les gouttes donnant l'arc secondaire visible par l'œil seront à plus haute altitude que celles donnant l'arc primaire. L'arc secondaire est donc vu au-dessus de l'arc primaire. D'autre part, les couleurs sont inversées car θ_3 est plus grand pour le violet que pour le rouge.

Les figures suivantes récapitulent l'ordre des couleurs.



Optique géométrique

2

Ce chapitre est consacré à la formation d'images par des systèmes optiques, c'est-à-dire un ensemble de composants optiques (dioptries ou miroirs) rencontrés successivement par les rayons lumineux. Le système optique le plus simple est le miroir plan, que nous étudierons en première partie. Puis nous étudierons les lentilles minces.

1 Miroir plan

1.1 Image d'un point objet par un miroir plan

Un **miroir plan** est une surface réfléchissante plane. Comme chacun sait, on « se voit » dans un miroir. L'optique géométrique explique cette constatation en termes de rayons lumineux.

a) Image par un miroir plan d'un point objet réel

Un **point objet réel** est un point d'où partent les rayons lumineux qui arrivent sur un système optique.

On considère un point objet réel A situé devant un miroir plan. Un observateur reçoit les rayons lumineux issus de A après qu'ils ont été réfléchis par (M) (voir figure 2.1). La loi de la réflexion fait que ces rayons semblent provenir du point A' symétrique de A par rapport au plan de (M) (voir figure 2.1).

On prouve maintenant ce résultat. Soit un rayon issu de A se réfléchissant sur (M) en I avec un angle

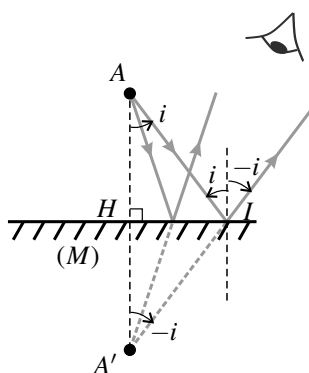


Figure 2.1 – Image d'un point objet réel par un miroir plan.

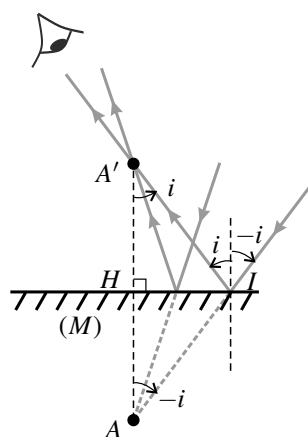


Figure 2.2 – Image d'un point objet virtuel par un miroir plan.

d'incidence quelconque i et soit A' le point d'intersection du prolongement du rayon réfléchi avec la droite normale au miroir passant par A . Sur la figure 2.1 on retrouve l'angle i en A par la propriété des angles alterne-interne et l'angle $-i$ en A' . Il vient alors :

$$\tan i = \frac{HI}{HA} = \frac{HI}{HA'} \quad \text{donc} \quad HA' = HA.$$

Ainsi, A' est le symétrique de A par rapport au plan du miroir. Il en est ainsi quel que soit l'angle d'incidence i donc tous les rayons réfléchis semblent venir de A' .

Pour l'œil qui reçoit les rayons réfléchis, tout se passe comme si ces rayons provenaient de A' . On dit que A' est l'image de A dans le miroir. C'est une image virtuelle.

Un **point image virtuel** A' est un point d'où semblent provenir les rayons lumineux sortant d'un système optique. Le prolongement des rayons au-delà de la surface du système passe par A' .

b) Image par un miroir plan d'un point objet virtuel

Un **point objet virtuel** A est un point vers lequel convergent les rayons lumineux arrivant sur un système optique. Le prolongement des rayons au-delà de la surface du système passe par A .

Sur la figure 2.2, le point A est un point objet virtuel pour le miroir (M). La géométrie est la même que sur la figure 2.1 avec des rayons lumineux parcourus dans l'autre sens. Les rayons réfléchis passent tous par le symétrique A' de A par rapport au plan du miroir. On dit que A' est l'image de A par le miroir. C'est une image réelle.

Un **point image réel** est un point par lequel passent les rayons lumineux sortant d'un système optique.

En plaçant un écran perpendiculaire aux rayons en A' , on voit un point lumineux net. Une image réelle peut être recueillie sur un écran.

1.2 Image d'un objet par un miroir plan

Un objet est un ensemble de points images. L'objet le plus simple que l'on puisse envisager est un vecteur $\overrightarrow{AB}$. Son image est le vecteur $\overrightarrow{A'B'}$ symétrique par rapport au miroir, soit un vecteur de même taille et de même sens. Le **grandissement** d'un miroir plan est égal à 1.

Un miroir plan donne de tout objet une image symétrique par rapport au plan du miroir.

2 Systèmes centrés et approximation de Gauss

2.1 Systèmes optiques centrés

Un **système optique centré** est un système optique dont les éléments constitutifs (dioptries, miroirs) ont un axe de symétrie commun. Cet axe est appelé **axe optique**. Il est orienté dans le sens de propagation de la lumière.

Les plans perpendiculaires à l'axe optique sont appelés **plans de front** (voir figure 2.4).

2.2 Approximation de Gauss

a) Exemple d'une lentille demi-boule

La figure 2.3 montre des **rayons incidents** parallèles traversant une demi-boule transparente d'indice $n = 1,5$, placée dans l'air d'indice optique $n_{\text{air}} = 1$. Les rayons sortant de la demi-boule sont les **rayons émergents**.

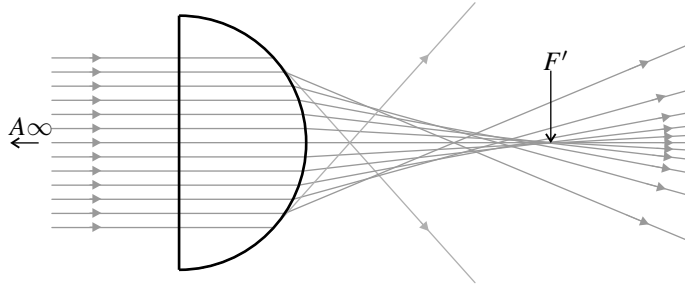


Figure 2.3 – Lentille demi-boule éclairée par un faisceau parallèle.

La demi-boule est un système centré. Les rayons incidents sont parallèles à son axe de symétrie, c'est-à-dire son axe optique. Ces rayons proviennent d'un point objet réel A situé à distance infinie dans la direction des rayons. On constate que les rayons émergents ne passent pas tous par un point image. Cependant, les cinq rayons les plus proches de l'axe optique passent quasiment par le point F' indiqué par la flèche sur la figure. La demi-boule ne donne pas une image rigoureuse comme le miroir plan, mais une image approchée *si l'on se restreint aux rayons proches de l'axe*.

b) Rayons paraxiaux, conditions de Gauss

Un rayon incident sur un système centré est dit **paraxial** quand les deux conditions suivantes sont respectées :

- le rayon est proche de l'axe optique du système ;
- le rayon est peu incliné par rapport à l'axe optique.

Un système centré est utilisé dans les **conditions de Gauss** si tous les rayons incidents sont des rayons paraxiaux.

2.3 Propriétés d'un système centré dans les conditions de Gauss

Les systèmes centrés s'utilisent toujours dans les conditions de Gauss. Ils ont alors les propriétés de **stigmatisme** et d'**aplanétisme** approchés.

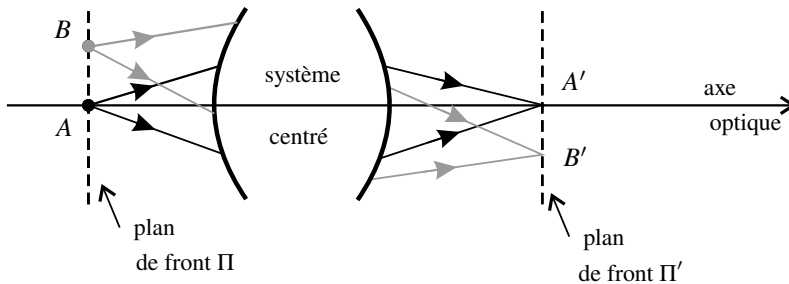
a) Stigmatisme approché

On admet le résultat suivant :

Un **système centré** utilisé **dans les conditions de Gauss** donne de tout point objet (pouvant être réel ou virtuel) une image ponctuelle approchée (pouvant être réelle ou virtuelle).

Ceci est représenté sur la figure 2.4 dans le cas de points objets réels et de points images réels. L'image de tout objet A appartenant à l'axe optique est un point A' appartenant aussi à l'axe optique.

Les points objet et image sont dits **conjugués** par le système optique.



b) Aplanétisme approché

Un point B du plan de front passant par A a son image B' dans le plan de front passant par A' (voir figure 2.4).

Les plans de front Π et Π' passant par A et par A' sont conjugués par le système optique.

De plus, par symétrie, les vecteurs $\overrightarrow{A'B'}$ et $\overrightarrow{AB}$ sont colinéaires. On peut montrer qu'il existe un nombre sans dimension γ tel que $\overrightarrow{A'B'} = \gamma \overrightarrow{AB}$. γ est appelé **grandissement linéaire** et on le définit traditionnellement par la relation :

$$\gamma = \frac{\overrightarrow{A'B'}}{\overrightarrow{AB}}.$$

Les mesures algébriques sont prises le long de deux axes orientés dans le même sens. Le grandissement γ est indépendant du point B mais *il dépend des plans Π et Π' conjugués*.

La signification physique du grandissement γ est la suivante :

- si $|\gamma| > 1$, l'image est plus grande que l'objet ; si $|\gamma| < 1$, l'image est plus petite que l'objet ;
- si $\gamma > 0$, l'image est droite, c'est-à-dire de même sens que l'objet ; si $\gamma < 0$, l'image est renversée par rapport à l'objet.

c) Le stigmatisme approché est-il suffisant ?

Les systèmes centrés dans les conditions de Gauss n'ont qu'un stigmatisme approché. Ainsi, lorsqu'on recueille l'image réelle d'un point sur un écran, on obtient non un point, mais une tache lumineuse plus ou moins grosse. Est-ce que cela peut être satisfaisant ? Quelle taille maximale de la tache peut-on accepter ?

Pour répondre à ces questions, il faut réfléchir à l'utilisation de l'image. Par exemple, dans le cas d'un appareil photographique, l'objectif forme l'image sur le capteur CCD qui est le récepteur photosensible de l'appareil. Ce capteur est une mosaïque de cellules élémentaires correspondant chacune à un pixel, c'est-à-dire un « point » sur l'image finale. Ces cellules ont une taille non nulle, de l'ordre de quelques micromètres. Le capteur ne fait pas la distinction entre un point parfait et une tache plus petite que la cellule élémentaire. En effet, si deux photons arrivent sur la même cellule élémentaire, ils sont identifiés comme arrivant au même point. Le stigmatisme approché de l'objectif est donc suffisant si la taille des taches images est inférieure à la taille d'une cellule élémentaire du capteur.

2.4 Foyer objet, foyer image

a) Point à l'infini

Un point à l'infini est un point situé à distance infinie du système. Les rayons passant par un point à l'infini sont parallèles entre eux. Le point est localisé à l'infini, dans la direction commune aux rayons.

b) Foyers principaux

On appelle **foyer image principal** l'image du point objet situé à l'infini dans la direction de l'axe optique. Ce point est noté F' . Les rayons incidents parallèles à l'axe optique donnent des rayons émergents qui passent tous par F' (voir figure 2.5).

On appelle **foyer objet principal** le point objet dont l'image est située à l'infini dans la direction de l'axe optique. Ce point est noté F . Les rayons incidents issus de F donnent des rayons émergents tous parallèles à l'axe optique (voir figure 2.6).

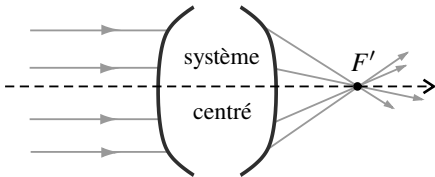


Figure 2.5 – Foyer image principal.

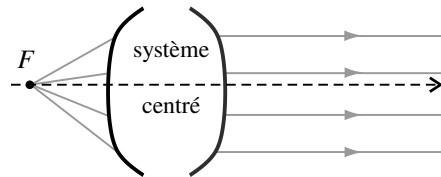


Figure 2.6 – Foyer objet principal.



Contrairement à ce que les notations pourraient laisser croire, le foyer principal image F' n'est pas le point conjugué du foyer principal objet F !

c) Foyers secondaires

Par aplanétisme, tout point objet à l'infini mais hors de l'axe optique a son image dans le plan de front passant par F' . Ce plan est appelé **plan focal image**. Les points du plan focal image sont des **foyers images secondaires** et notés F'_s . Un faisceau incident de rayons parallèles entre eux, mais non parallèles à l'axe optique, est transformé en un faisceau convergent vers un foyer image secondaire (voir figure 2.7).

De même, on appelle **plan focal objet** le plan de front passant par F . Les points F_s de ce plan sont des **foyers objets secondaires**. Un faisceau incident issu d'un foyer objet secondaire donne un faisceau de rayons parallèles entre eux, mais non parallèles à l'axe optique (voir figure 2.8).

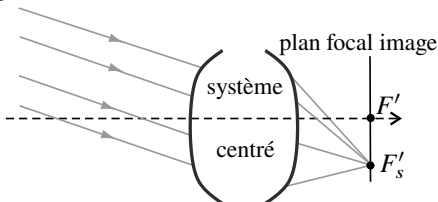


Figure 2.7 – Foyer image secondaire.

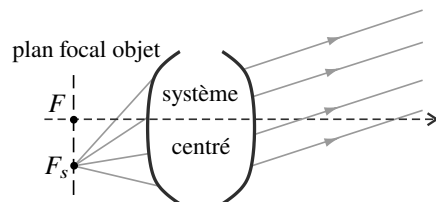


Figure 2.8 – Foyer objet secondaire.