

Thème 3 : Ondes et signaux

Chapitre 2 : Emission et propagation de la lumière

I - La lumière des étoiles

1) Différents types de lumières

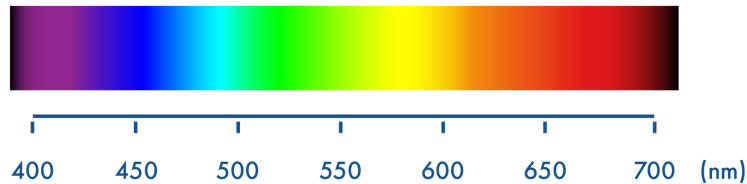
a) La lumière polychromatique

Que ce soit avec un **prisme** ou un **réseau**, il est possible de **décomposer la lumière**, et d'en observer le **spectre**. Ces systèmes sont dits **dispersifs**.

Le spectre de la **lumière blanche** émise par une lampe à incandescence est **continu**. Il s'étend du rouge au violet et comporte **toutes les couleurs visibles** par l'œil humain.



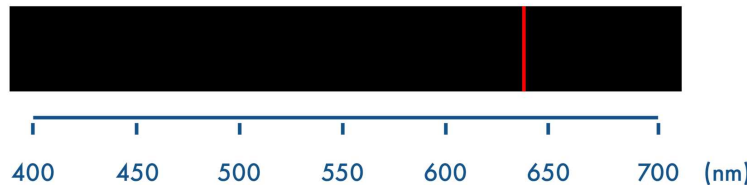
Spectre de la lumière blanche :



b) La lumière monochromatique

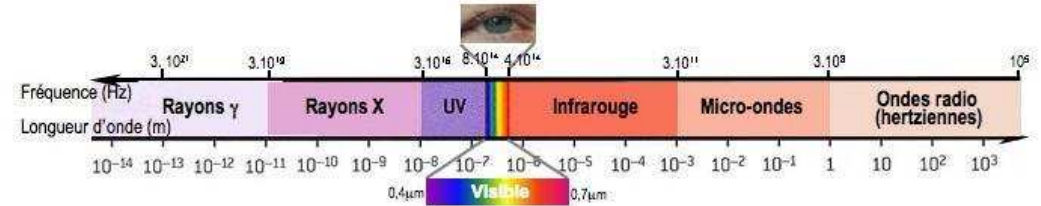
Le **spectre** de la lumière émise par un **laser** est constitué **d'une seule raie colorée**. Cette lumière est monochromatique, et est appelée radiation.

Une **radiation** est caractérisée par sa **longueur d'onde λ (lambda)**, généralement exprimée en nanomètre (*nm*).



c) La lumière et l'humain

Dans le vide ou dans un milieu (air, eau etc.), les longueurs d'onde des radiations de la **lumière blanche** s'étendent de **400 nm à 700 nm** environ. L'œil humain est sensible à ces longueurs d'ondes.



Remarque :

La « lumière visible » n'est qu'une partie du spectre des ondes électromagnétiques. En effet, l'œil humain ne voit aucune autre radiation, autrement dit, ni les radiations ultraviolettes (UV), ni les radiations infrarouges (IR), etc.

d) Récapitulatif

Comme la lumière blanche, une lumière polychromatique est composée de plusieurs couleurs ou radiations.

Comme la lumière d'un laser, une lumière monochromatique est composée d'une seule couleur ou radiation.

Les longueurs d'onde de la lumière blanche visible s'étendent de 400 nm à 700 nm environ.

2) Spectres d'émission et d'absorption

a) Spectre continu et température

i) Lien couleur-température

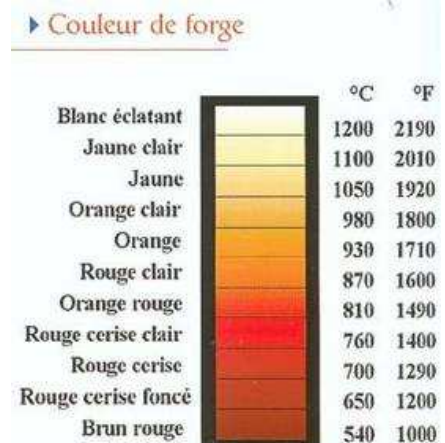
Considérons un corps **fortement chauffé** : ce corps peut être solide, liquide ou gazeux à une pression élevée.

Sa couleur dépend de sa température et non pas de sa composition.

Quand la température du corps augmente, sa couleur passe du rouge au jaune, puis au blanc.

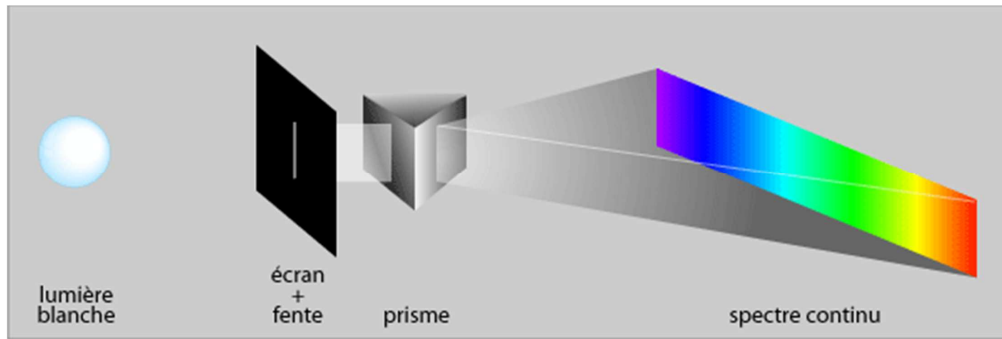
Ainsi vers 850 °C, une barre en acier est rouge cerise tandis qu'aux environ de 1 100 °C, elle devient jaune.

A 2 700 °C, le filament de tungstène d'une lampe à incandescence est d'un blanc éblouissant.



ii) **Lien température-spectre d'émission**

Le spectre de la lumière émise par le filament d'une lampe à incandescence est totalement différent de celui du spectre de raies d'émission d'un atome ou d'un ion : **c'est un spectre continu.**



Fortement chauffé, un corps solide, liquide ou gazeux sous forte pression émet un rayonnement d'origine thermique, dont le spectre est continu.

Le spectre d'émission continu d'un corps fortement chauffé dépend de sa température.

Quand la température augmente, des radiations de longueurs d'onde de plus en plus petites apparaissent : le rayonnement se déplace vers le violet.

Vidéo :



Thème 3 - Chapitre 2 - Lien couleur - température lumière blanche.webm

iii) **Récapitulatif**

Le spectre de la lumière émise par un corps dense et chaud est un spectre continu.

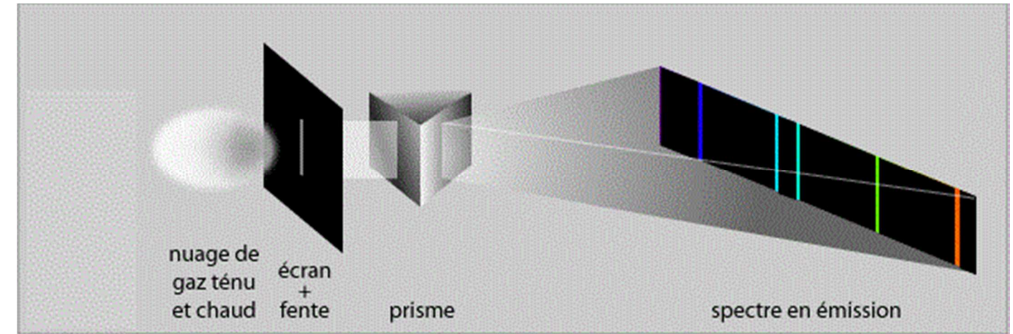
La couleur de la lumière émise par un corps dense passe du rouge sombre au blanc brillant quand sa température augmente.

Le spectre de la lumière émise par un corps dense et chaud s'enrichit progressivement vers le violet lorsque la température augmente.

b) **Spectre de raies et signatures des atomes**

i) **Spectre de la lumière émise par un gaz**

Considérons une fente éclairée par cette lumière et l'image de la fente formée sur un écran par un dispositif imageur. Lorsque l'on place un système dispersif comme un prisme ou un réseau sur le trajet lumineux, on observe à l'écran différentes raies colorées.



Un gaz à basse pression, lorsqu'il est chauffé ou soumis à des décharges électriques, émet de la lumière.

L'émission lumineuse est due aux collisions entre les atomes, les ions ou les molécules du gaz chaud, ou entre ceux-ci et les électrons des décharges électriques. On dit alors que le gaz est excité.

La lumière émise par un **gaz excité** est composée d'une ou plusieurs radiations (couleurs) monochromatiques (une seule couleur).

Elles sont déviées différemment selon leur couleur par un prisme ou un réseau.

La figure observée sur un écran est un spectre de raies d'émission.

Remarque :

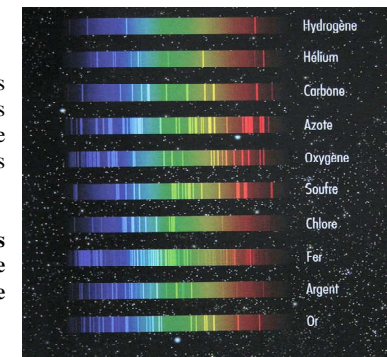
Un réseau peut comme un prisme disperser la lumière.

Toutefois, la dispersion par un réseau est obtenue via un phénomène de diffraction tandis que la dispersion par un prisme est obtenue via un phénomène de réfraction.

ii) **Spectre d'une entité chimique**

Les longueurs d'onde des raies d'un spectre d'émission ont des valeurs différentes d'une entité chimique à une autre, qu'ils s'agissent d'atomes ou d'ions.

L'observation des raies caractéristiques d'une entité chimique dans la lumière émise par un gaz excité y révèle la présence de cette entité.



iii) **Récapitulatif**

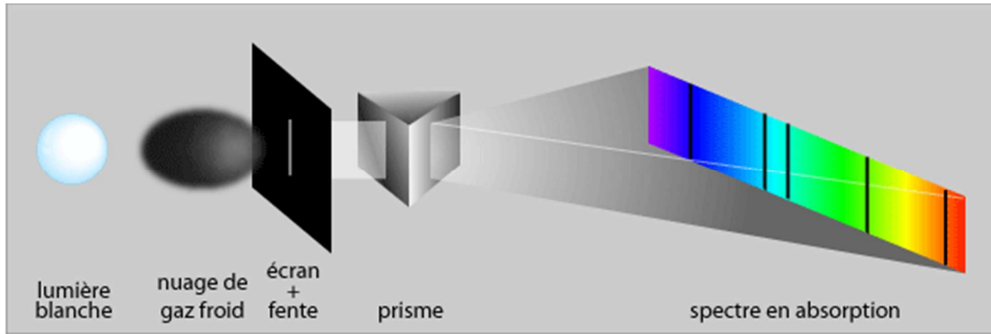
Le spectre de la lumière émise par un gaz sous faible pression constitué d'atomes ou d'ions simples indépendants est un spectre de raies.

Chaque type d'atome ou d'ion possède un spectre de raies bien déterminé qui permet de l'identifier.

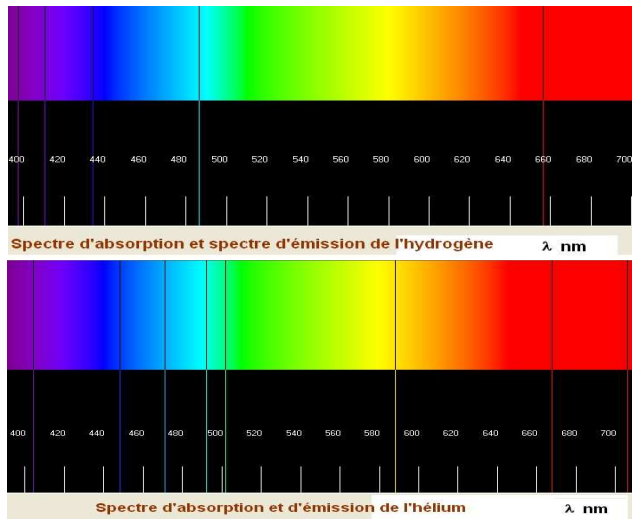
c) Spectre d'absorption

i) Notion

Eclairons un gaz froid à basse pression par une source de lumière dont le spectre continu contient toutes les radiations du visible.



Dans le spectre de la lumière qui a traversé le gaz, certaines radiations ont été absorbées par le milieu : on parle alors de spectre de raies d'absorption.



Les raies d'absorption sont noires et leurs longueurs d'onde sont celles des raies colorées présentes dans le spectre d'émission du même gaz.

Remarque :

La complémentarité des spectres d'émission de raies et d'absorption permet, en les superposant, de retrouver le spectre continu de la lumière blanche.

ii) Récapitulatif

Le spectre d'absorption d'une substance est le spectre de la lumière obtenue après la traversée de cette substance par la lumière blanche.

Un gaz constitué d'atomes ou d'ions simples produit un spectre d'absorption de raies.

Les raies du spectre associé à un atome ou un ion sont complémentaires dans le spectre d'émission et dans le spectre d'absorption.

Une entité chimique (atome ou ion) ne peut absorber que les radiations qu'elle est capable d'émettre.

3) Que nous apprend la lumière venant des étoiles ?

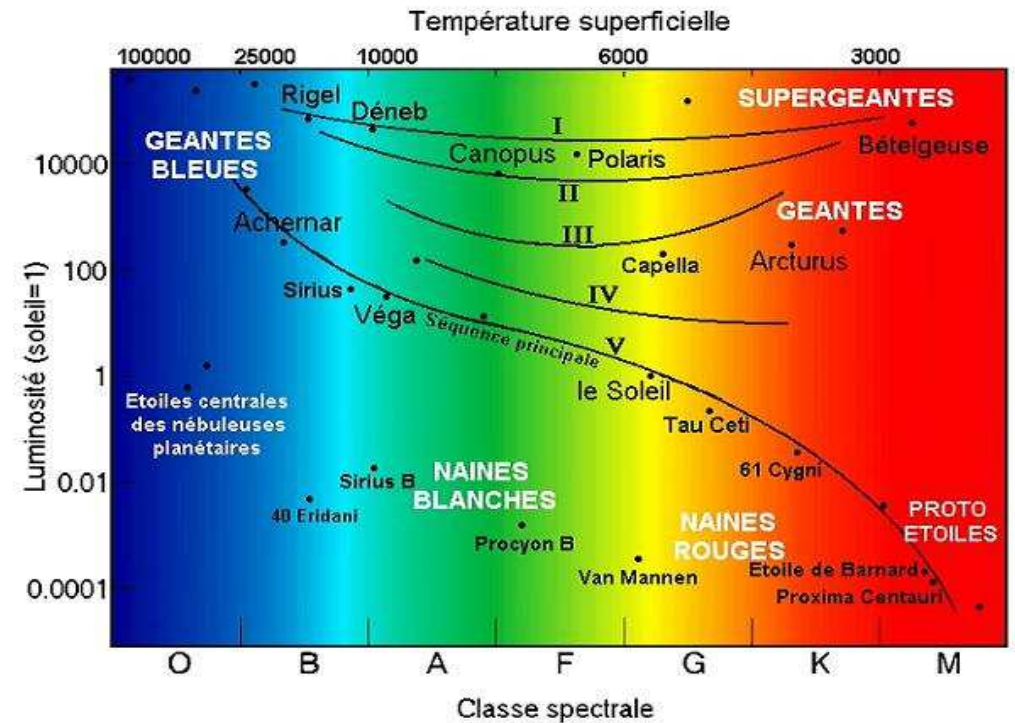
a) Fond continu et température

Le Soleil est une boule de gaz composée essentiellement d'hydrogène (79 %) et d'hélium (20 %).

La température dans le cœur du Soleil est de 15 millions de degrés environ. Mais la lumière qui nous éclaire est émise par sa surface, la photosphère, beaucoup moins chaude, à 6 000 °C environ, il en est de même dans toutes les étoiles, à des températures différentes.

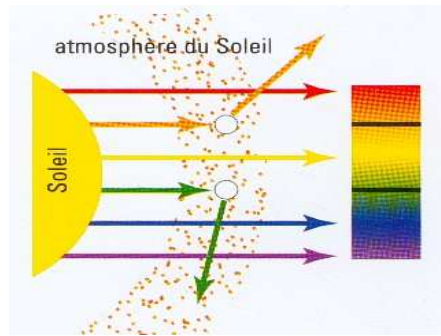
La lumière d'une étoile provient de sa photosphère.

Cette couche de gaz chaud et dense émet un rayonnement thermique dont le spectre est continu.



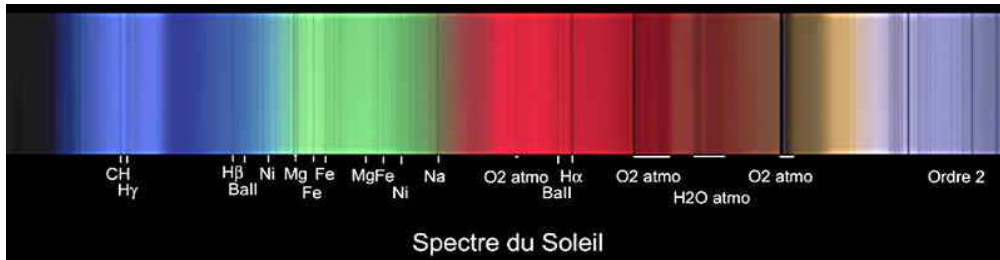
b) L'absorption par l'atmosphère

Après avoir été émise par la photosphère, la lumière traverse une couche de gaz moins dense, considérée comme l'atmosphère de l'étoile. Parmi les radiations de la lumière émise par la photosphère, certaines sont absorbées par les entités chimiques contenues dans l'atmosphère de l'étoile.



L'analyse des raies d'absorption du spectre d'une étoile renseigne donc sur la composition chimique de son atmosphère.

En 1814, le physicien allemand Joseph Von Fraunhofer observe dans le spectre du Soleil plus de 20 000 raies répertoriées dues aux gaz présents dans sa chromosphère.



c) Composition chimique des étoiles

L'analyse chimique des étoiles réalisées à partir de leurs spectres montre qu'elles sont constituées presque exclusivement d'hydrogène et d'hélium.

On trouve aussi tous les éléments chimiques présents sur la Terre, mais en très petites quantités.

Remarque :

L'absence de raies d'absorption d'un atome ou d'un ion dans un spectre stellaire ne signifie pas l'absence de cette entité dans l'atmosphère de l'étoile. Celle-ci doit également présenter des conditions particulières de température et de pression pour absorber les radiations correspondantes.

Classe	température	couleur	raies d'absorption
O	> 25 000 K	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
B	10 000 - 25 000 K	bleue-blanche	hélium, hydrogène
A	7 500 - 10 000 K	blanche	hydrogène
F	6 000 - 7 500 K	jaune-blanche	métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	5 000 - 6 000 K	jaune	calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 500 - 5 000 K	jaune-orange	métaux et oxyde de titane
M	< 3 500 K	rouge	métaux et oxyde de titane

d) Récapitulatif

La couleur de l'étoile dépend directement de la température de sa photosphère.

L'analyse des raies d'absorption du spectre d'une étoile donne des informations sur la composition chimique de son atmosphère.

Le Soleil, comme toute étoile, est principalement composé des éléments chimiques hydrogène (H) et hélium (He).

II - La valeur de la vitesse de la lumière

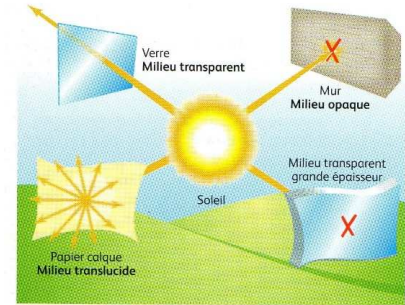
1) La propagation de la lumière

L'air et la plupart des gaz, l'eau et la plupart des liquides, le verre et quelques solides se laissent traverser par la lumière.

Ces corps sont dit transparents.

La plupart des solides arrêtent la lumière : ils sont opaques.

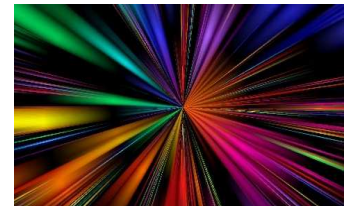
Les milieux transparents solides ou liquides deviennent souvent opaques lorsqu'ils ont une très grande épaisseur.



Certains corps, comme le papier calque ou le verre dépoli laissent passer la lumière, mais ne permettent pas de distinguer des détails des objets émettant la lumière : ils sont translucides.

2) Valeur de la vitesse de la lumière dans le « vide »

Dans la vie courante, la lumière semble se propager de façon instantanée d'une lampe allumée par exemple, jusqu'aux objets qu'elle éclaire.



En réalité, la lumière se propage avec une vitesse déterminée, mais de tellement grande valeur qu'il a été pendant longtemps, très difficile de la mesurer.

Désormais, on sait maintenant que la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide est de :

$$c_{vide} = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c_{vide} \approx 300\,000\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

La valeur approchée de la vitesse de la lumière peut se réécrire $c_{vide} = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ou encore $c_{vide} = 300\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

3) Valeur de la vitesse de la lumière dans les milieux

Dans notre environnement (air, mer, etc.), la lumière se déplace dans les « milieux ».

On admet en première approximation que la lumière se propage à la même vitesse dans le vide et dans l'air.

Dans les autres milieux transparents, la lumière se déplace moins vite.

On appelle indice de réfraction d'un milieu homogène transparent le rapport des vitesses de propagation de la lumière dans le vide ($c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$) et dans le milieu considéré (v).

C'est un nombre sans unité et est noté n :

$$n = \frac{c}{v} \quad \left| \begin{array}{l} n \text{ sans unités} \\ c \text{ en } m.s^{-1} \\ v \text{ en } m.s^{-1} \end{array} \right.$$

Exemples :

- dans l'eau : $v_{eau} = 2,25 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- dans un verre : $v_{verre} = 2,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Quelques valeurs d'indice de réfraction :

Milieu	Vide	Air	Eau	Glace	Verre	Diamant
Indice de réfraction	1,00	1,000 293 \approx 1,00	1,33	1,31	1,52 à 1,62	2,42

4) Récapitulatif

La lumière traverse les milieux transparents et translucides (air, vide, eau, verre). Elle est arrêtée par les milieux opaques (la plupart des solides).

La lumière se propage dans le vide à la vitesse constante de $c_{vide} = 300\,000 \text{ km.s}^{-1}$ soit $c_{vide} = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

La lumière se propage dans l'air également à la vitesse de $c_{vide} = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Dans les autres milieux transparents, la valeur de la vitesse de la lumière y est toujours inférieure.

L'indice de réfraction est une grandeur sans unités et s'exprime par la relation : $n = \frac{c}{v}$ où c est la valeur de la vitesse dans le vide.

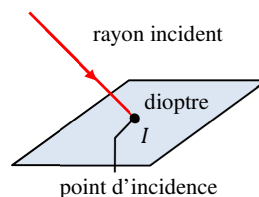
III - Réfraction et dispersion de la lumière

1) Les lois de la réfraction

a) Le dioptre

Un dioptre est constitué d'une surface séparant deux milieux transparents différents.

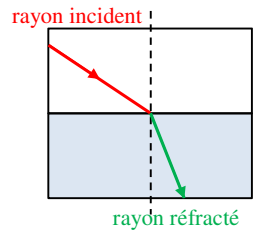
Le dioptre est plan quand la surface est plane.



Un dioptre est désigné par les deux milieux transparents que rencontre successivement la lumière lorsqu'elle le traverse.

Exemple :

Le dioptre air/verre signifie que le trajet de la lumière s'effectue de l'air vers le verre.



b) Le phénomène de réfraction

La réfraction correspond au changement de direction de la lumière lorsqu'elle passe d'un milieu de propagation à un autre.

Le rayon lumineux qui arrive sur le dioptre est appelé rayon incident.

De l'autre côté de la surface, il donne un rayon réfracté.

Exemple :

La lumière émise par un laser se réfracte sur le dioptre air/eau.

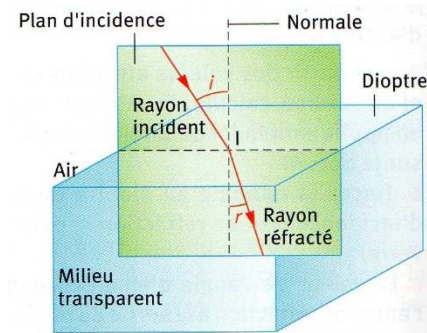


c) Etude de la réfraction

Le plan d'incidence est le plan contenant le rayon incident et la normale, perpendiculaire à la surface.

L'angle entre la normale au point d'incidence et le rayon incident s'appelle l'angle d'incidence.

L'angle de réfraction est l'angle entre cette même normale et le rayon réfracté.



Remarque :

Les valeurs des angles d'incidence et de réfraction repérés tous deux par rapport à la normale au dioptre, sont donc comprises entre 0° et 90° .

d) Les lois de Snell-Descartes de la réfraction

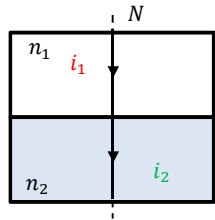
Au début du 17^{ème} siècle, le physicien néerlandais Willebrord Snell (1580 – 1626) et le philosophe et scientifique français René Descartes (1596 – 1650) ont établi des lois concernant la réfraction de la lumière.

Les lois de Snell-Descartes s'énoncent telles que :

- 1^{ère} loi : le rayon incident, le rayon réfracté et la normale sont contenus dans le plan d'incidence ;
- 2^{ème} loi : le rayon réfracté et le rayon incident sont situés de part et d'autre de la normale ;
- 3^{ème} loi : l'angle d'incidence i_1 et l'angle de réfraction i_2 sont reliés par la relation : $n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2$ où n_1 est l'indice de réfraction du milieu 1 et où n_2 est l'indice de réfraction du milieu 2.

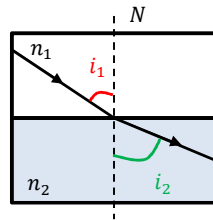
cas n°1 : si $i_1 = i_2 = 0^\circ$

alors pas de réfraction



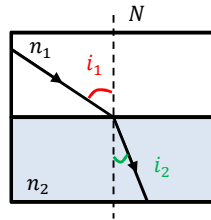
cas n°2 : si $n_1 > n_2$

alors $i_1 < i_2$



cas n°3 : si $n_1 < n_2$

alors $i_1 > i_2$



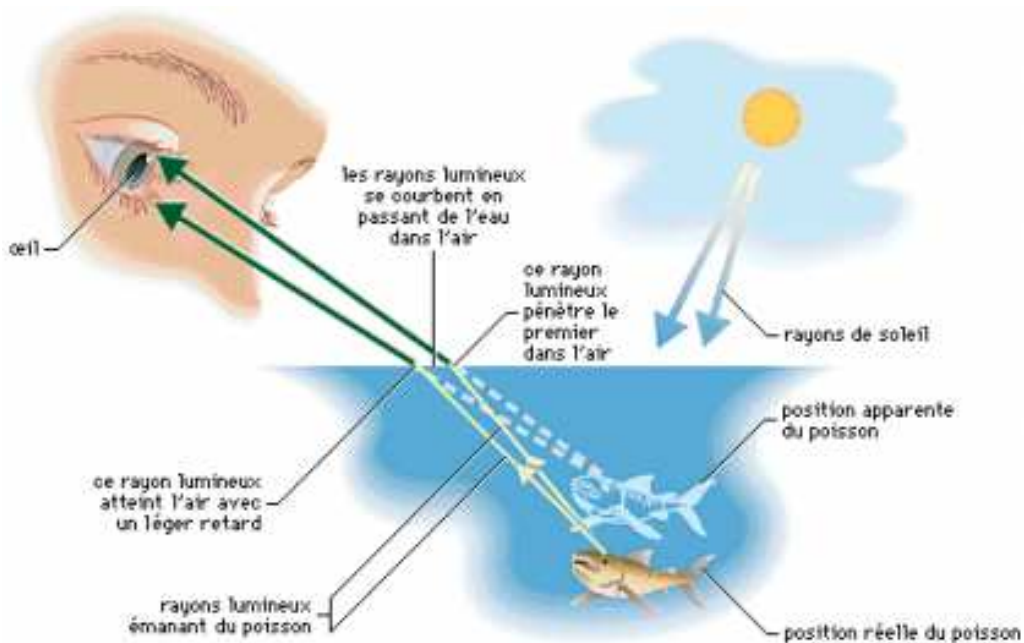
Remarque :

Ces lois sont appelées « lois de la réfraction ».

Il existe également les lois de Snell-Descartes pour la réflexion.

e) La réfraction et le cerveau

Ce phénomène est bien connu par les pêcheurs au harpon.



Spontanément, le cerveau considère que le rayon réfracté est rectiligne et imagine le poisson à l'intersection des prolongements des rayons réfractés (traits en pointillés), alors qu'en réalité, le poisson est à l'intersection des rayons réfractés.

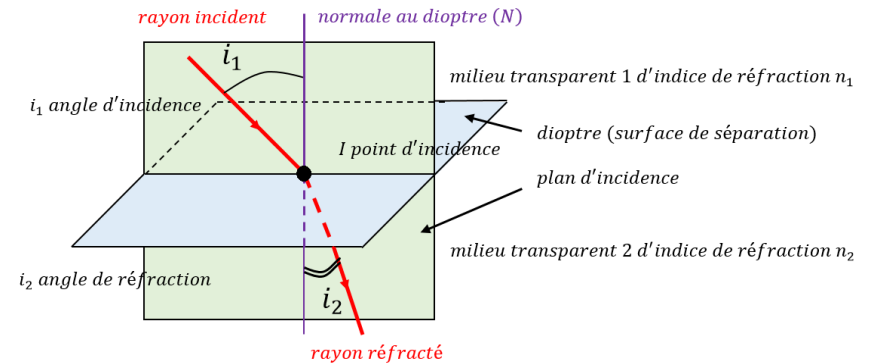
f) Récapitulatif

La réfraction correspond au changement de direction que subit un rayon lumineux quand il traverse la surface séparant deux milieux transparents différents, autrement dit un dioptre.

Les lois de la réfraction sont régies par les lois de Snell-Descartes.

Lors du passage d'un milieu d'indice n_1 d'angle d'incidence i_1 à un milieu d'indice n_2 d'angle de réfraction i_2 par un rayon lumineux, on peut écrire une relation telle que :

$$n_1 \times \sin i_1 = n_2 \times \sin i_2$$

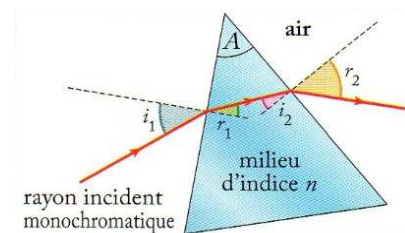


2) Réfraction de la lumière et indice

a) Indice de réfraction d'un milieu transparent

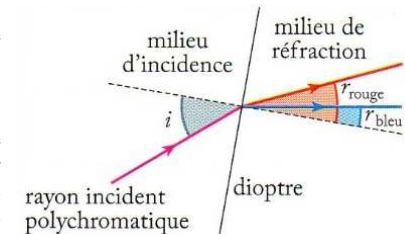
En passant à travers un prisme en verre, la lumière franchit deux dioptres : le dioptre air/verre, puis le dioptre verre/air.

Puisqu'un prisme réfracte différemment les radiations (ou couleurs) qui composent la lumière blanche, cela signifie que l'indice du verre n'a pas la même valeur selon les longueurs d'onde de ces radiations.



L'indice de réfraction du verre varie de manière non négligeable avec la longueur d'onde : le verre est un milieu dispersif.

L'indice de réfraction de l'air varie de manière négligeable avec la longueur d'onde : l'air est un milieu peu dispersif et sera même considéré comme non dispersif en première approximation.



Longueur d'onde λ (nm)	400	600	800
Air	1,000 283	1,000 277	1,000 275
Verre	1,470	1,458	1,453

L'indice d'un milieu transparent, solide ou liquide varie avec la longueur d'onde de la radiation qui le traverse.

Plus cette variation est importante, plus le milieu est dispersif.

Remarque :

La loi de Cauchy, est une loi donnant la dépendance de l'indice d'un milieu vis-à-vis de la longueur d'onde :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

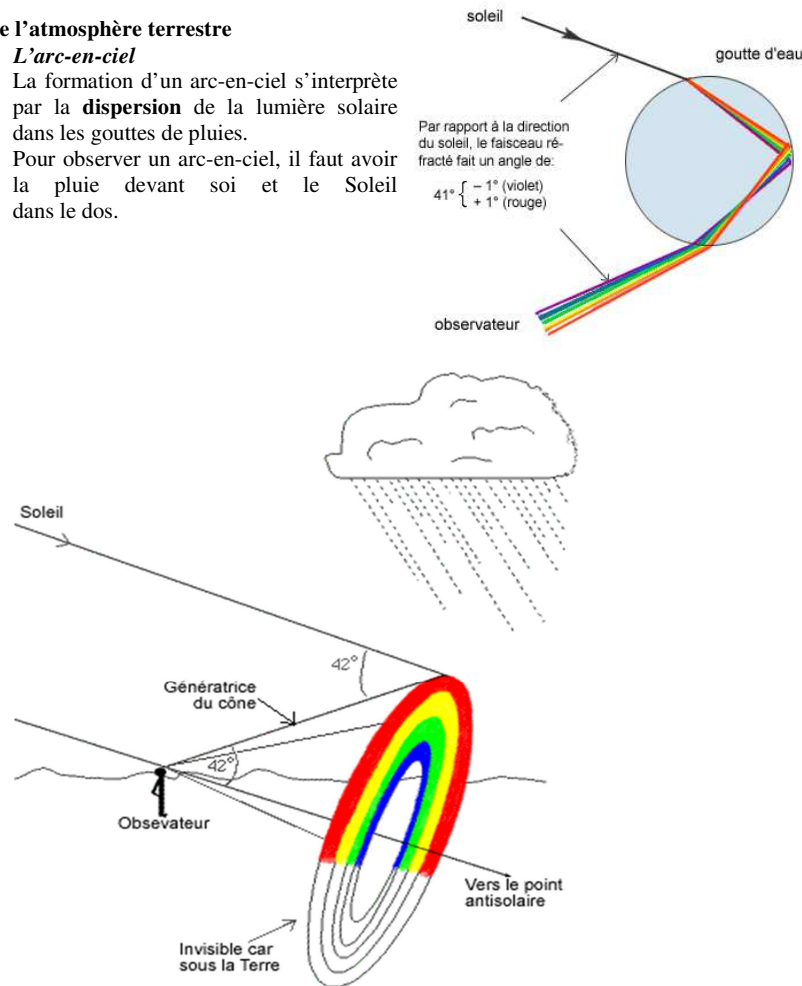
où A et B sont des constantes propres à chaque matériau.

b) Cas de l'atmosphère terrestre

i) L'arc-en-ciel

La formation d'un arc-en-ciel s'interprète par la **dispersion** de la lumière solaire dans les gouttes de pluies.

Pour observer un arc-en-ciel, il faut avoir la pluie devant soi et le Soleil dans le dos.



ii) Les mirages

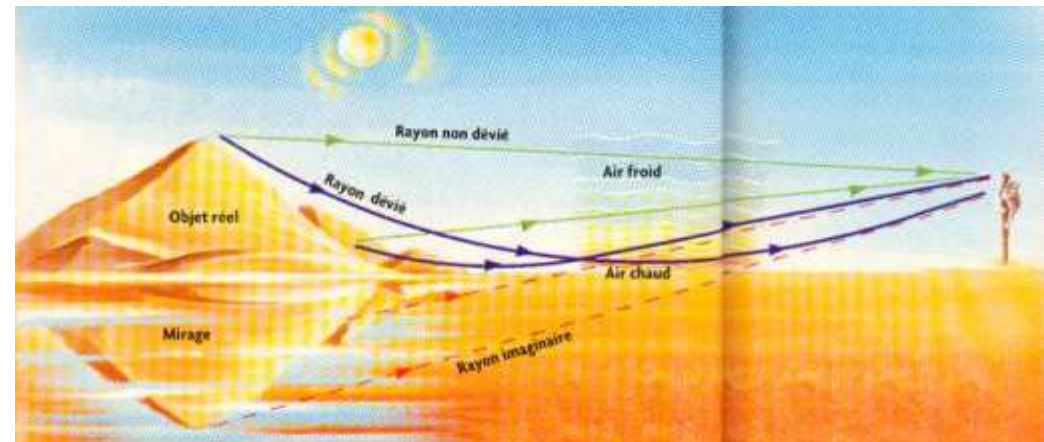
Dans un milieu NON homogène la lumière ne se propage pas en ligne droite.

Dans l'atmosphère, l'indice de réfraction de l'air dépend de la température : il augmente lorsque la courbure des rayons qui se propagent depuis un objet jusqu'à l'œil d'un observateur. C'est le **phénomène de mirage**.

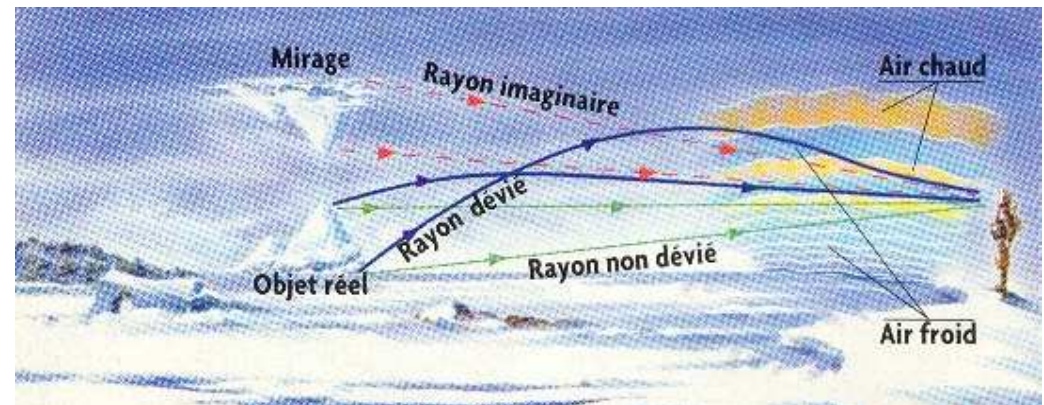
On distingue deux types de mirages :

- le **mirage chaud ou mirage inférieur** n'est pas un phénomène réservé aux déserts brûlants. On l'observe couramment sur les routes en été.

L'indice de réfraction de l'air varie en fonction de sa distance au sol. L'œil reçoit alors la couleur du ciel par un rayon lumineux s'étant rapproché du sol avant de subir une déviation. Cela crée l'impression d'une flaque d'eau lointaine qui disparaît quand on s'avance.



- le **mirage froid ou mirage supérieur**, c'est le contraire des mirages chauds ou inférieurs : les couches les plus chaudes se trouvent élevées dans l'atmosphère alors que les couches les plus froides sont près du sol. Avec la rotondité de la Terre, tout objet au-delà de la ligne d'horizon peut alors apparaître.



iii) **La scintillation des étoiles**

En astronomie, la scintillation est la fluctuation rapide de l'éclat lumineux des étoiles lorsqu'on les observe à l'œil nu.

Les mouvements incessants de l'atmosphère terrestre font varier la densité et la température de l'air en un lieu donné.

Cela en modifie légèrement l'indice de réfraction. La lumière venant d'une étoile doit traverser l'atmosphère terrestre avant de nous parvenir. Elle subit de nombreuses réfractions sur des différences couches d'air.

La direction de sa propagation est en permanence modifiée par le changement des indices de réfraction.

Cela provoque la **scintillation des étoiles**.



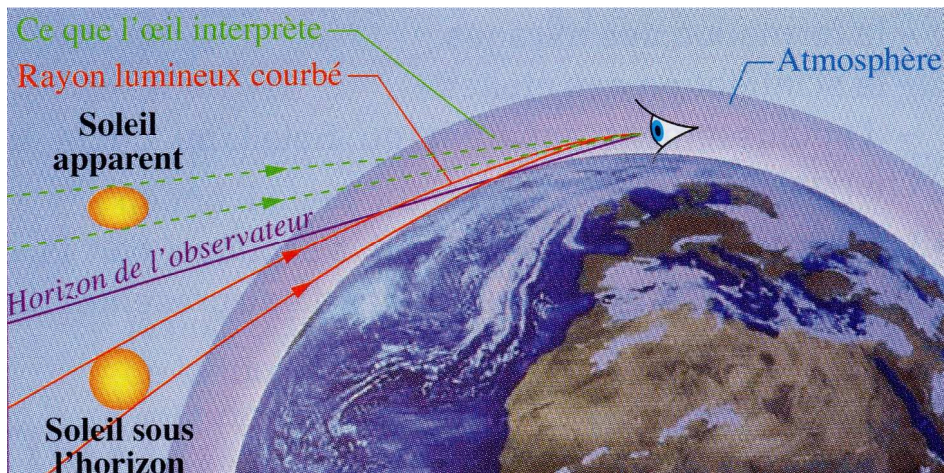
iv) **La position des astres**

La réfraction de la lumière dans l'atmosphère donne au Soleil une image aplatie lorsqu'il est proche de l'horizon.

Une déformation du même type est parfois visible pour la Lune.

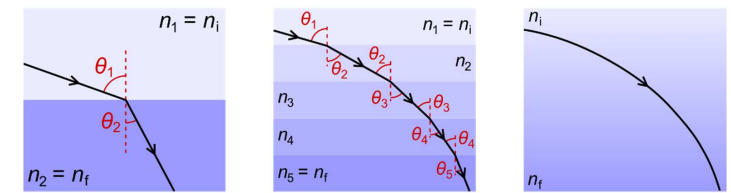
A cause de la réfraction, le Soleil, les étoiles ou la Lune peuvent aussi être visible au-dessus de l'horizon alors qu'en réalité ils sont déjà couchés ou pas encore levés !

Le Soleil est perçu au-dessus de sa position réelle, cela allonge la durée du jour. Ainsi, lors des équinoxes, la durée d'éclairement est supérieure à 12 heures.



Remarque :

Pour expliquer ce phénomène, on découpe en tranches fines l'atmosphère, puis on applique les lois de Snell-Descartes.



c) **Récapitulatif**

L'indice de réfraction d'un milieu transparent dépend de la longueur d'onde de la radiation qui le traverse.

Le phénomène de réfraction est notamment présent dans le cas de milieux non homogènes. Il permet d'expliquer la formation des mirages ou d'un arc-en-ciel.

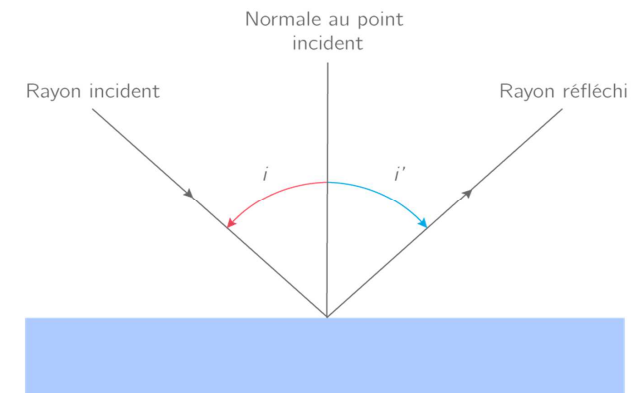
3) **Réflexion de la réflexion**

a) **Le phénomène de réflexion**

La réflexion de la lumière est le changement de direction que subit un rayon lumineux lorsqu'il traverse la surface séparant deux milieux d'indices de réfraction différents et qu'il reste dans le milieu initial.

Soit un rayon lumineux incident arrivant sur une surface séparant deux milieux d'indices de réfraction différents avec un angle d'incidence i .

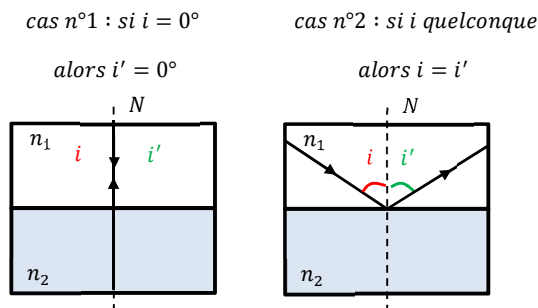
Il apparaît un rayon réfléchi définissant un angle de réflexion i' par rapport à la normale au dioptre.



b) Les lois de Snell-Descartes de la réflexion

Les lois de Snell-Descartes s'énoncent telles que :

- 1^{ère} loi : le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale sont contenus dans le plan d'incidence ;
- 2^{ème} loi : le rayon réfléchi et le rayon incident sont situés de part et d'autre de la normale ;
- 3^{ème} loi : l'angle d'incidence i et l'angle de réflexion i' sont reliés par la relation : $i = i'$.



Remarque :

Ces lois sont appelées « lois de la réflexion ».

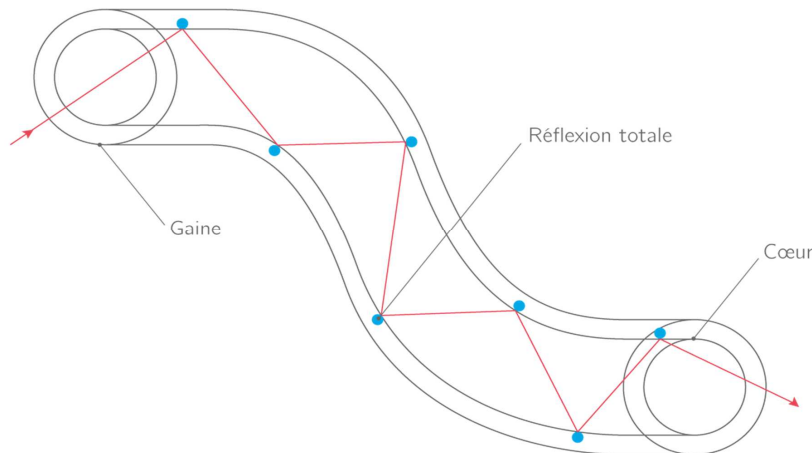
Lorsque l'indice de réfraction du milieu 2 est plus petit que celui du milieu 1, l'angle de réfraction r est plus important que l'angle d'incidence i .

Il existe une valeur de i appelée angle de réfraction limite pour lequel l'angle de réfraction atteint la valeur maximale de 90° .

Au-delà de cette valeur, il n'y a plus de rayon réfracté, la lumière est totalement réfléchie.

c) Application à la santé

Une fibre optique est un fil constitué de deux milieux d'indices de réfraction différents un cœur et une gaine tels que $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine}}$ permettant la propagation de la lumière par réflexions totales successives.



La fibroscopie ou endoscopie est une technique d'imagerie médicale permettant de visualiser les parois de certains organes en y insérant un tube souple muni d'une source lumineuse qui piège la lumière à l'intérieur de la même façon que dans une fibre optique.



d) Récapitulatif

La réflexion totale survient lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre milieu d'indice moins élevé et que l'angle d'incidence dépasse une valeur limite.

Les lois de la réflexion sont régies par les lois de Snell-Descartes, on peut écrire une relation telle que : $i = i'$.

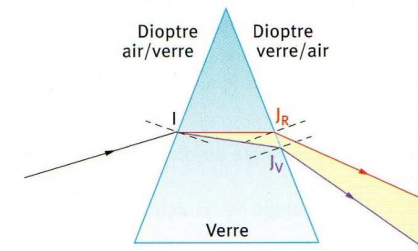
4) Dispersion de la lumière

a) Dispersion par un prisme

Considérons un rayon de lumière rouge et un rayon de lumière violette superposés, arrivant en I sur un dioptré air/verre.

La valeur de l'indice de réfraction du verre, pour la radiation violette (1,66) est supérieure à sa valeur pour la radiation rouge (1,61).

Sur le schéma ci-contre, les rayons ont été tracés en appliquant la 3^{ème} loi de Snell-Descartes pour le dioptré d'entrée air/verre et pour le dioptré de sortie verre/air.



Pour la réfraction en I , le rayon violet est plus dévié que le rayon rouge.

Le point d'incidence J_R pour le rouge sur la surface de sortie est différent du point J_V pour le violet.

L'angle d'incidence en J_V est supérieur à l'angle d'incidence en J_R .

A cette différence s'ajoute une déviation plus importante pour le rayon violet que pour le rouge.



Un prisme dévie donc plus la radiation violette que le rouge.

Remarque :

Tous les milieux matériels transparents sont plus ou moins dispersifs excepté le vide.

b) Récapitulatif

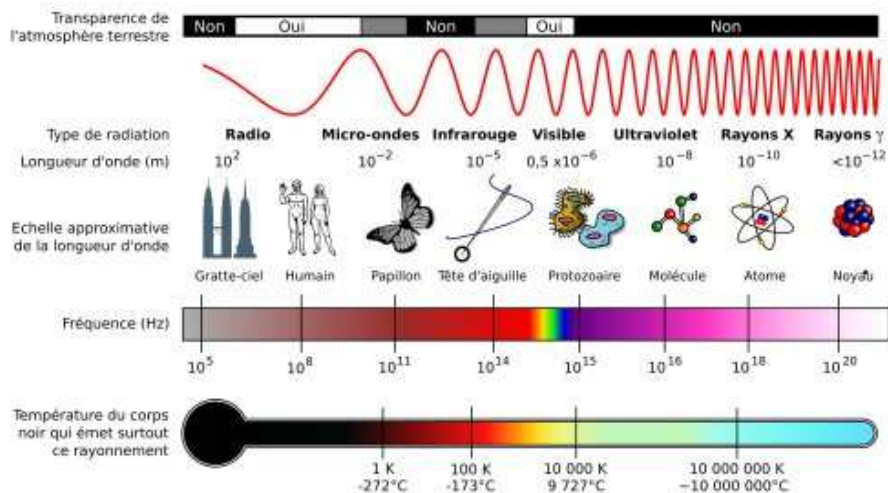
Un milieu est dispersif dès que son indice de réfraction dépend de manière non négligeable avec la longueur d'onde de la radiation qui le traverse.

Un prisme est un milieu dispersif qui dévie plus le violet que le rouge.

Seul le vide n'est pas dispersif, son indice de réfraction est strictement égale à 1 et ne dépend pas de la longueur d'onde de la radiation lumineuse.

ANNEXES

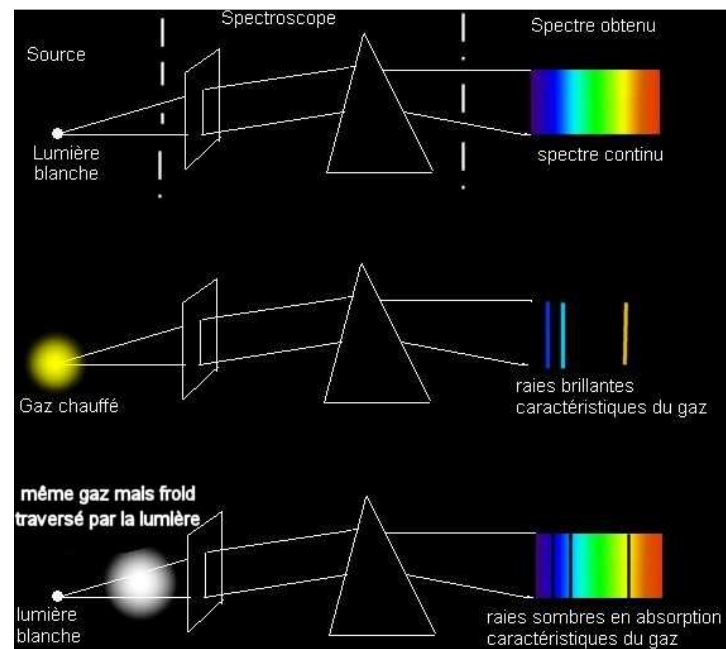
SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE



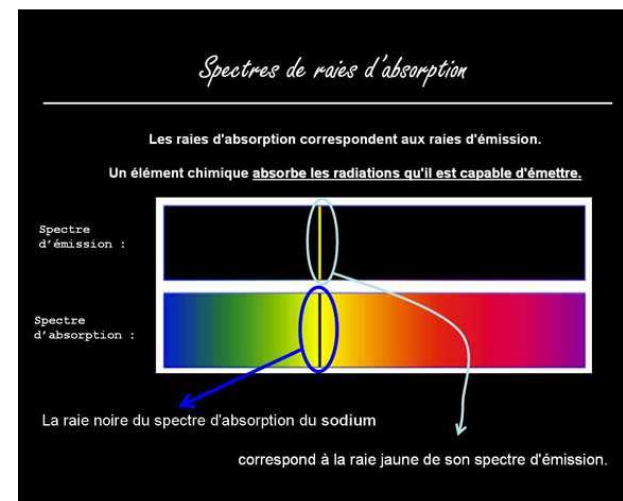
PRINCIPALES COULEURS DE LA LUMIERE BLANCHE

Désignation	Couleur	Longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz)
Rouge		~ 625 - 740	~ 480 - 405
Orange		~ 590 - 625	~ 510 - 480
Jaune		~ 565 - 590	~ 530 - 510
Vert		~ 520 - 565	~ 580 - 530
Cyan		~ 500 - 520	~ 600 - 580
Bleu		~ 450 - 500	~ 670 - 600
Indigo		~ 430 - 450	~ 700 - 670
Violet		~ 380 - 430	~ 790 - 700

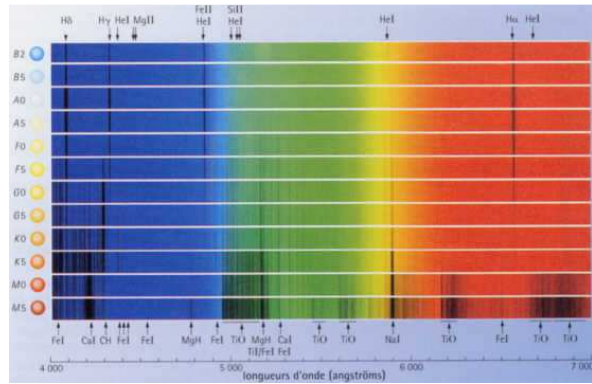
PRINCIPE EMISSION ET ABSORPTION



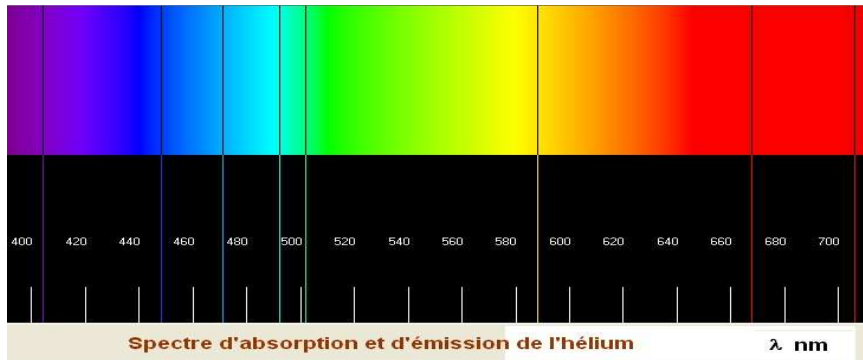
SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE



SPECTRES D'ETOILES

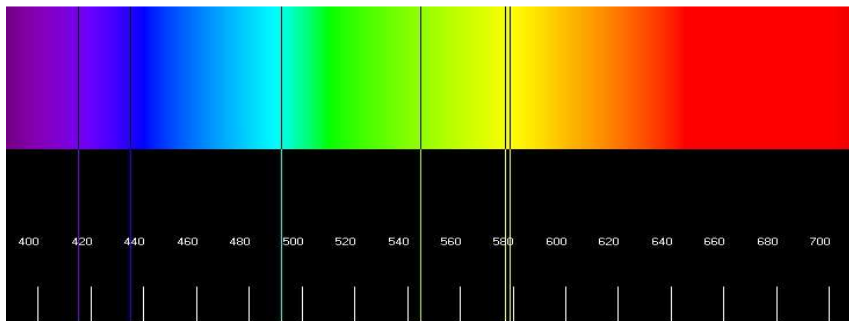


SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE HELIUM



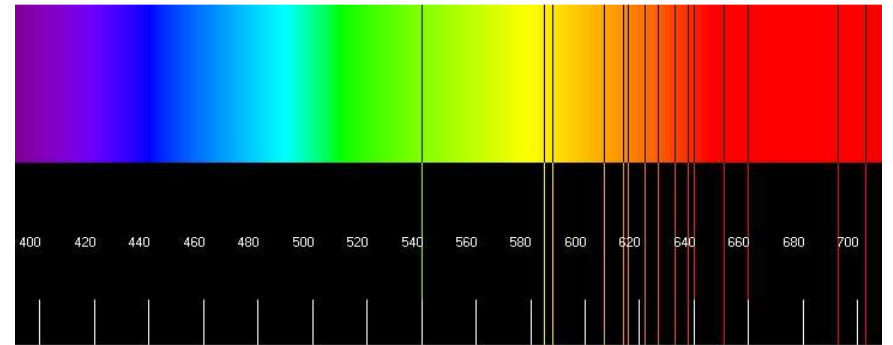
Spectre d'absorption et d'émission de l'hélium λ nm

SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE MERCURE



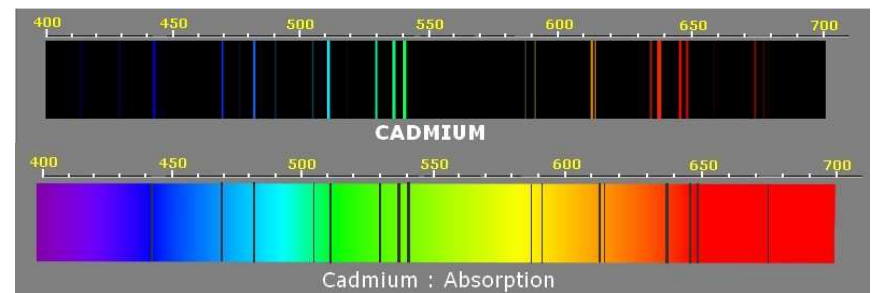
Spectre d'absorption et d'émission du mercure λ nm

SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE NEON



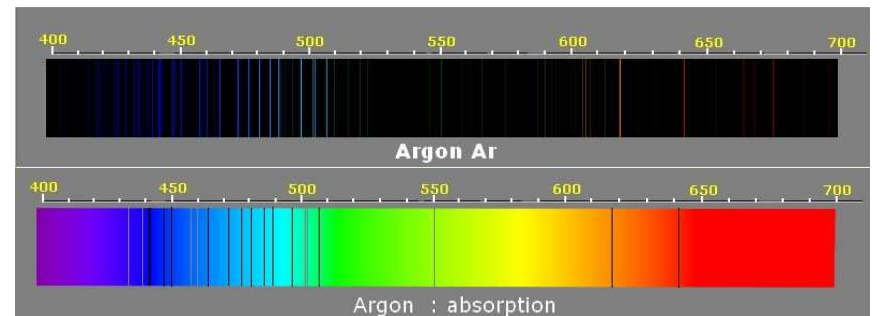
Spectre d'absorption et d'émission du Néon λ nm

SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE CADMIUM



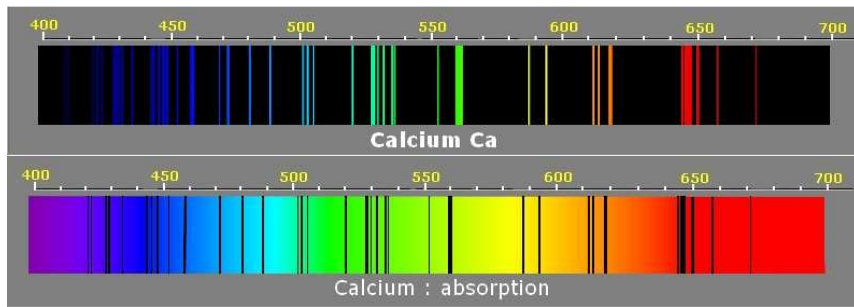
Cadmium : Absorption

SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE ARGON

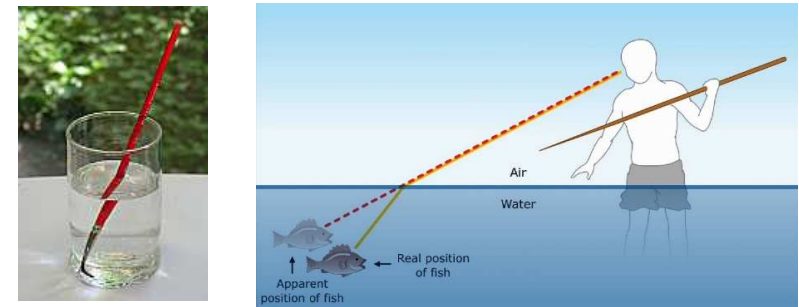


Argon : absorption

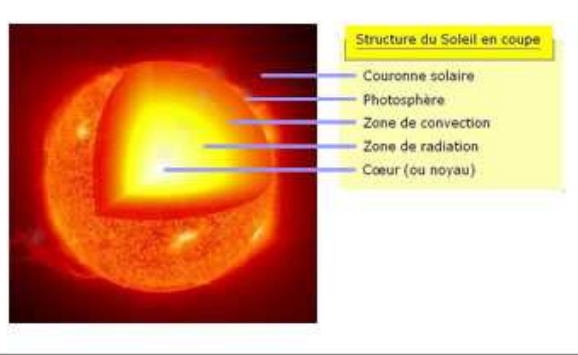
SPECTRE DE RAIES : COMPLEMENTARITE CALCIUM



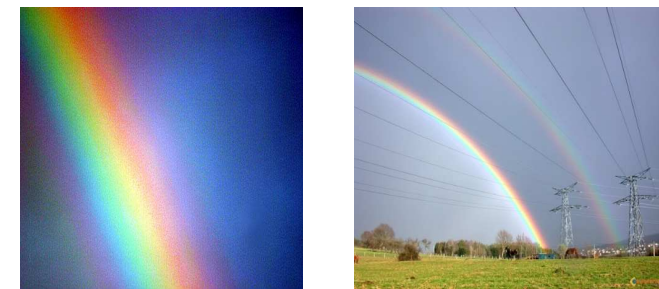
PHOTOGRAPHIES ILLUSTRANT LA REFRACTION



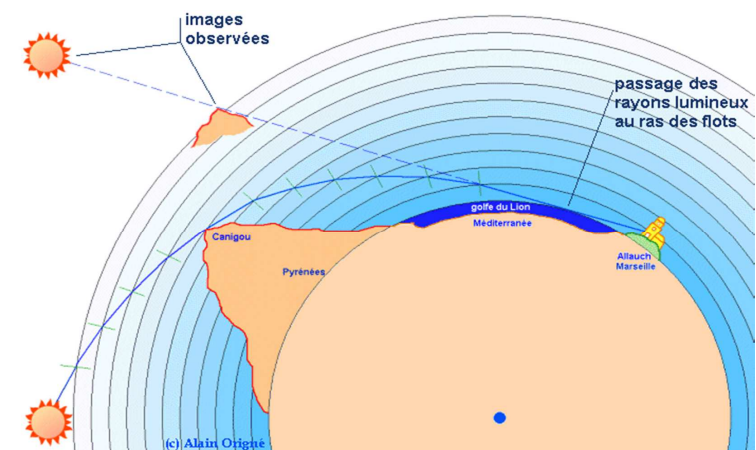
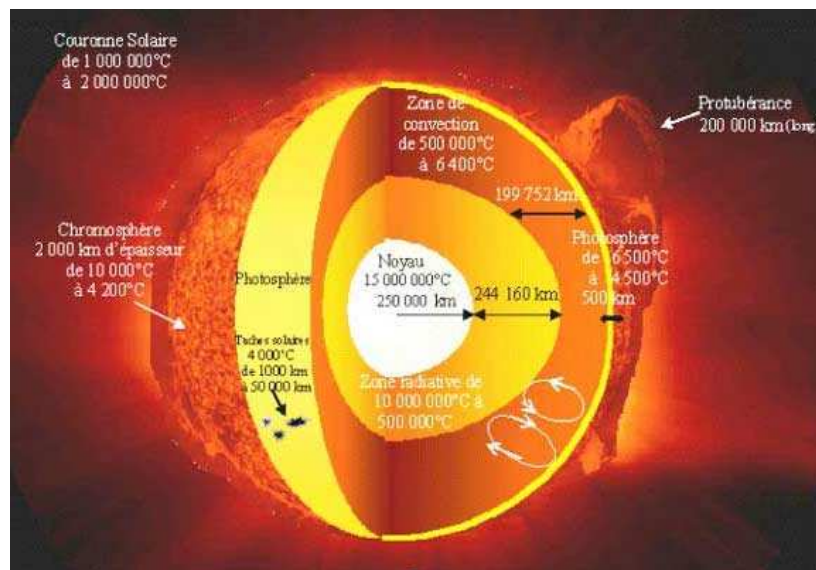
COMPOSITION DU SOLEIL



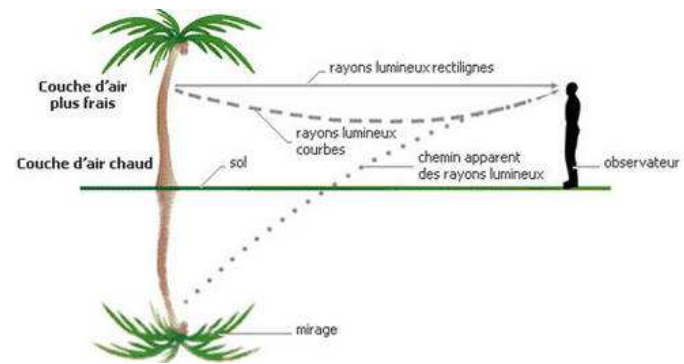
PHOTOGRAPHIES D'ARC-EN-CIEL



POSITION DES ASTRES ET MILIEU INHOMOGENE



MIRAGE INFERIEUR



MIRAGE SUPERIEUR

