

Introduction à l'optique géométrique.

Introduction.

L'optique géométrique permet d'étudier la formation d'images par des instruments d'optique : lentilles, miroirs, lunettes astronomiques, télescopes, microscopes dans les conditions habituelles d'utilisation.

Elle s'appuie sur une description purement géométrique du comportement des rayons lumineux produits par les sources.

Elle présente l'avantage d'utiliser une description simple de la lumière et de réduire le comportement des différents éléments d'optique à l'expression de quelques lois. La simplicité du modèle utilisé induit cependant des limites à la validité de cette description de la lumière.

1. La lumière est une onde électromagnétique.

1.1. Notion d'onde et de propagation de l'onde.

Définition : Une onde progressive est une perturbation d'un milieu, générée par une source, et qui se déplace dans l'espace, sans qu'il n'y ait de déplacement global de la matière qui constitue le milieu de propagation.

- La source donne un certain nombre de caractéristiques à l'onde, comme sa périodicité, son amplitude, la nature de l'onde (lumineuse, mécanique, électrique, ...).
- Le milieu va déterminer comment évolue le phénomène, à quelle vitesse, dans quelle direction, s'il est déformé ou atténué au cours de la propagation.

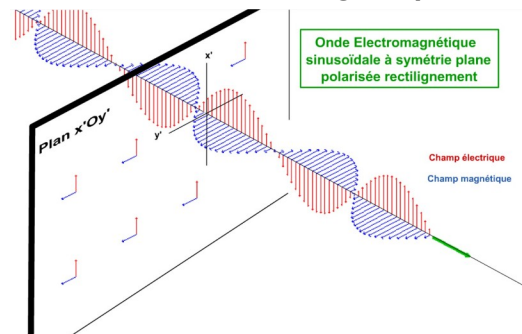
Exemples :

- Une onde sonore est produite par un haut-parleur qui met faiblement en mouvement l'air à son contact.
 - ✓ Les caractéristiques du mouvement du haut-parleur fixe l'évolution temporelle de l'onde.
 - ✓ L'onde sonore se propage et l'évolution de l'onde au cours de la propagation dépend des caractéristiques de ce milieu. Par exemple la célérité (ou vitesse) du son est d'environ 340m.s^{-1} dans l'air et d'environ 1500m.s^{-1} dans l'eau.
- Une onde de surface sur un lac est générée lorsqu'on lance une pierre dans l'eau.
 - ✓ Les caractéristiques de l'impact entre la pierre et la surface constitue la source de l'onde et en fixe l'évolution temporelle à l'impact.
 - ✓ L'onde de surface se propage alors dans toutes les directions à la même vitesse à la surface du lac formant la figure en cercle que tout le monde connaît. Au fur et à mesure de la propagation, l'amplitude de l'onde faiblit.

1.2. Les ondes électromagnétiques et le spectre des ondes électromagnétiques.

Pour les ondes électromagnétiques, les propriétés physiques qui évoluent périodiquement dans le temps et l'espace lors de la propagation sont les champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$.

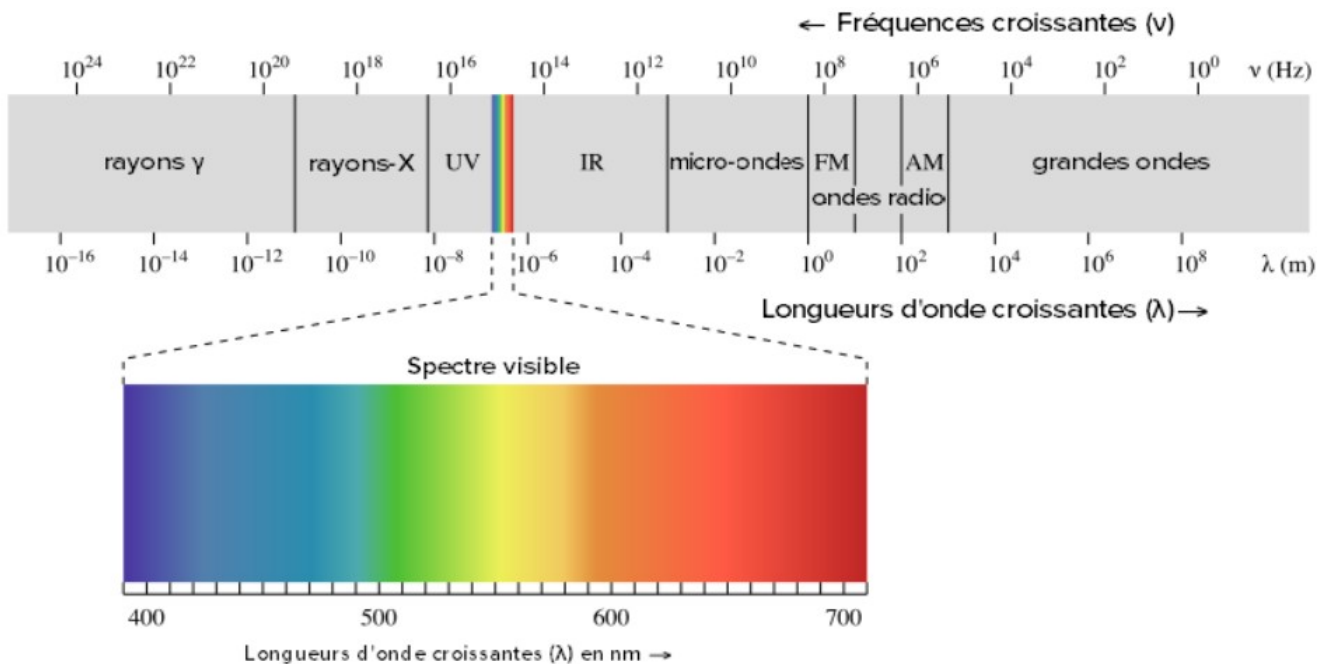
Elles se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière dans le vide notée $c = 3,00.10^8\text{m.s}^{-1}$.



Les ondes électromagnétiques sont regroupées en différentes sous-familles qui ont été nommées au fur et à mesure de leur découverte. On peut les visualiser sous la forme d'un graphique donnant le nom du domaine ondulatoire en fonction de la longueur d'onde (dans le vide) λ_0 de l'onde concernée.

Pour chacune de ces longueurs d'onde dans le vide, qui caractérise l'aspect périodique spatiale de l'onde lumineuse dans le vide, on peut associer une fréquence qui caractérise l'aspect périodique temporelle de l'onde en se rappelant que :

L'onde parcourt une période spatiale appelée **longueur d'onde** λ_0 dans le vide pendant une **période** temporelle correspondant à une durée $T=1/f$ où **f** est la **fréquence de l'onde** à la **célérité c**. Ce qui donne $\lambda_0 = c \cdot T = \frac{c}{f}$



Les fréquences associées dans le domaine lumineux sont très grandes, par exemple pour une longueur d'onde de 500nm (au centre du spectre lumineux), on obtient une fréquence de $6 \cdot 10^{14}$ Hz.

On retiendra :

- L'allure globale du spectre présenté ci-dessus.
- Le domaine du visible entre 400nm (violet) et 750-800nm (rouge). Encadré de l'ultraviolet pour les longueurs d'onde plus faibles et l'infrarouge pour les longueurs d'onde plus forte.

1.3. La source lumineuse fixe le spectre de l'onde lumineuse produite.

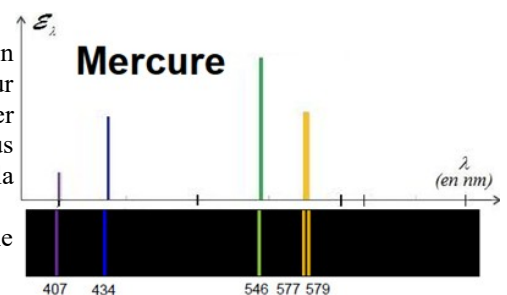
Les sources lumineuses produisent une lumière qu'on peut caractériser par la donnée de leurs spectres c'est-à-dire par la répartition selon les longueurs d'onde (ou les fréquences) de l'intensité lumineuse produite par cette source.

Quelques exemples de spectres associés à des sources classiquement rencontrées :

- Un laser produit une lumière dont le spectre est extrêmement réduit, toute l'intensité lumineuse est concentrée sur un domaine caractérisée par une longueur d'onde centrale $\lambda_{0,m}$ dans le visible (par exemple 632,8nm pour un Laser He-Ne de TP) et une largeur à mi-hauteur $\delta\lambda$ très faible ($2 \cdot 10^{-3}$ nm). La longueur d'onde est donc quasiment fixée puisque le rapport $\delta\lambda/\lambda_{0,m} \approx 3 \cdot 10^{-6}$.
- Les lampes à vapeur métallique produisent des spectres plus riches comportant en général plusieurs raies dans le domaine visible.

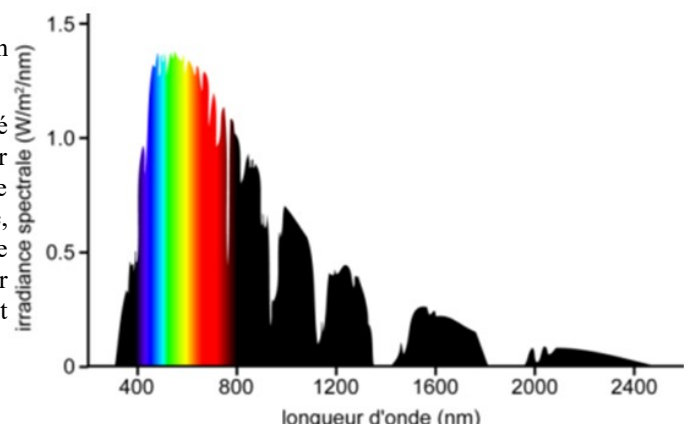
On donne souvent une représentation de ces spectres par l'observation qui peut en être faite à travers un spectromètre (bande noire avec les raies colorées sur l'image ci-contre). Avec les spectromètres à fibre moderne, on peut visualiser l'intensité lumineuse de chaque raie, et représenter un spectre donnant, en plus des longueurs d'onde dans le vide à laquelle elle correspond, l'intensité de la lumière produite.

Lorsqu'on étudie la structure fine de ces raies, on observe qu'elles présentent une largeur très faible de l'ordre du nm



Le spectre thermique du soleil avec les raies d'absorption caractéristiques de sa composition chimique.

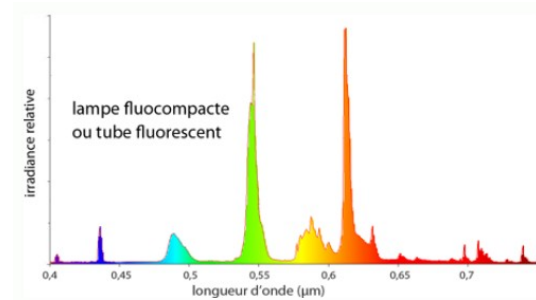
Ici aussi on donne une représentation graphique de l'intensité lumineuse produite par la source en fonction de la longueur d'onde. La différence notable avec les cas précédent, c'est que la source émet de la lumière pour toutes les longueurs d'onde, on lui donne le nom de spectre continu. Ce type de spectre présente une allure universelle mais la longueur d'onde autour de laquelle il se déploie dépend de la température de l'objet étudié.



AD 1 : Eclairage de la vie quotidienne.

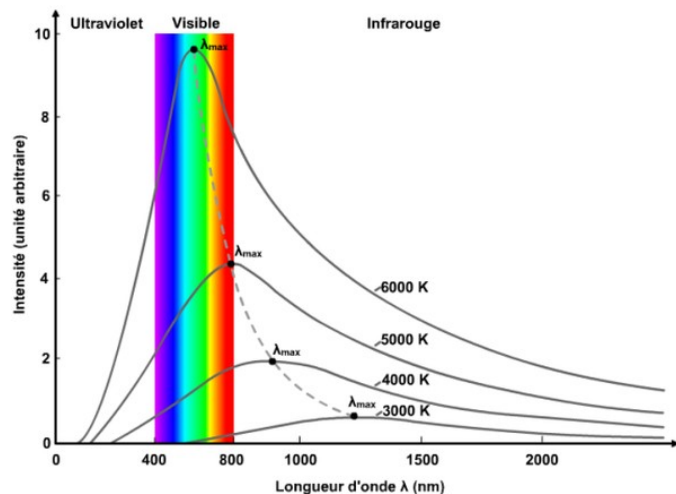
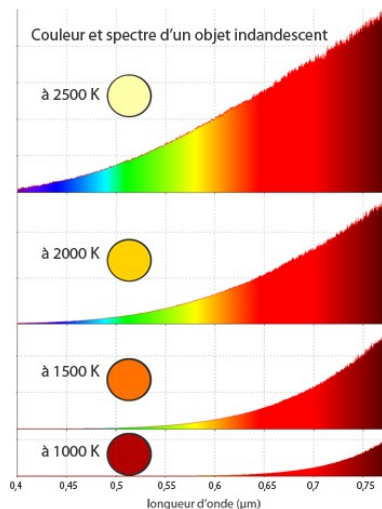
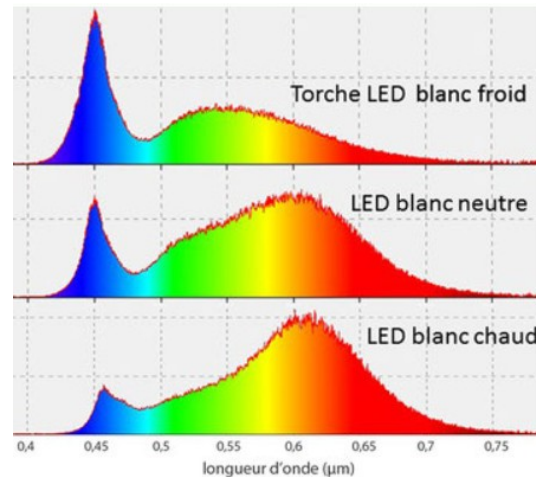
On donne ci contre le spectre d'émission dans le visible d'une lampe fluocompacte, autrement appelée lampe à économie d'énergie d'usage courant.

1. Décrire ce spectre par exemple à l'aide d'un tableau récapitulatif des données qu'il présente.



On donne maintenant ci-contre les spectres de trois torches à technologie LED qu'on caractérise dans le vocabulaire courant par les qualificatifs « froid », « neutre » et « chaud ».

2. Décrire les différences entre les spectres de ces trois lampes et expliquer alors le sens des termes utilisés.
3. En étudiant les spectres des sources incandescentes présentées ci-dessous, commenter la pertinence (ou la non pertinence) de l'usage des notions de « chaud » et « froid » pour ces LED.



Spectres de sources incandescentes en fonction de leur température.

Corrigé de l'AD1 :

1. Sur le spectre proposé, on observe des bandes de longueur d'onde plus ou moins intenses mais non quantifiable de manière absolue, on peut proposer le tableau suivant :

Longueur d'onde (μm)	≈0,44	≈0,49	≈0,54	≈0,59	≈0,62	D'autres pics négligeables dans l'IR
Couleur	Bleu	Turquoise	Vert	Orange	Rouge	
Intensité	Faible	Faible	Intense	Faible	Intense	
Largeur(μm)	<10 ⁻²	≈2.10 ⁻²	≈2.10 ⁻²	≈3.10 ⁻²	≈3.10 ⁻²	

2. Entre les trois spectres, on observe une évolution de la répartition de la puissance émise selon les longueurs d'onde et les couleurs :
 - Pour le spectre dit « froid », on observe un pic de puissance émise dans la partie bleue à petites longueurs d'onde du spectre ce qui correspondra à une lumière émise blanche-bleutée donnant un rendu froid.
 - Pour le spectre dit « chaud », on observe un pic de puissance émise dans la partie rouge à grandes longueurs d'onde du spectre ce qui correspondra à une lumière blanche-orangée donnant un rendu chaud.
 - Pour le spectre neutre, on découvre une situation intermédiaire entre les deux cas précédents.
3. En analysant les deux graphiques, on observe que plus une source incandescente présente une température élevée plus son spectre se décale vers les longueurs d'onde les plus petites.

Autrement dit, pour une source incandescente dont le spectre traduit la température, une lumière bleutée correspond à une source chaude, et une lumière rouge à une source froide. Par exemple, pour les étoiles, les géantes rouges sont « froides » de température 3000K, alors que les géantes bleues sont « chaudes » de température 10000K et plus (elles émettent alors fortement dans l'UV).

L'usage commercial des termes « chaud » et « froid » se fait donc en référence à des sensations visuelles culturelles codifiées (l'eau froide sur le bleu, l'eau chaude sur le rouge) et non en référence à une température physiquement mesurée pour la source lumineuse étudiée.

1.4. Modèle de la source ponctuelle monochromatique.

Pour décrire une source lumineuse quelconque, on la décompose selon deux principes.

- Une décomposition spatiale : On suppose que l'objet lumineux peut être découpé en un ensemble de sources quasi-ponctuelles qui émettent chacune de la lumière indépendamment des autres points de la source.

Pour construire l'image d'un objet étendu, on utilise ce principe : si on considère un objet de forme rectiligne comme un segment [AB], on construit les images A' et B' des extrémités puis on construit naturellement et sans trop se poser de question l'image complète [A'B'] du segment [AB] en joignant les deux points extrêmes de l'image.

- Une décomposition spectrale : On suppose que chaque composante du spectre, c'est-à-dire chaque longueur d'onde présente dans le spectre, de la source produit sa propre intensité lumineuse indépendamment des autres.

Ici aussi, lorsque la lumière est polychromatique, on effectue assez naturellement la composition. Tout le monde sait par exemple, qu'on reproduit sur les écrans d'ordinateur une large palette de sensations colorées en superposant les lumières émises sur chaque pixel par trois chromatophores R (rouge), V (vert), B (bleu).

2. Propagation de la lumière. Rayons lumineux.

2.1. Vitesse de propagation dans un milieu transparent homogène isotrope.

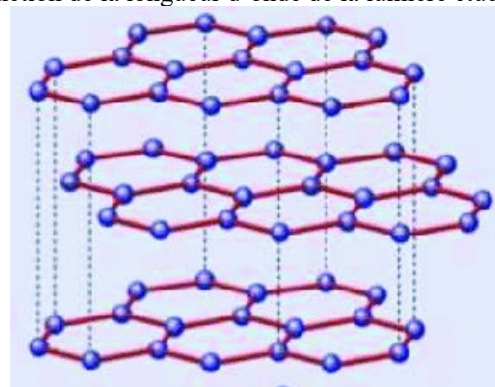
On va considérer dans l'ensemble des études qui seront menées cette année des systèmes qui seront composés à partir d'un ensemble de milieux homogènes et isotropes séparés par des interfaces (encore appelés dioptres).

Définition : Un milieu est dit homogène si les caractéristiques physiques de ce milieu sont invariantes lorsqu'on se déplace dans ce milieu.
Un milieu est dit isotrope si les caractéristiques physiques de ce milieu sont invariantes lorsqu'on change la direction d'observation de ce milieu.
Un milieu est dit parfaitement transparent si la lumière s'y propage sans perte d'énergie.

Exemples : les gaz et les liquides « bien mélangés » sont des milieux homogènes et isotropes. On étudiera la plupart du temps ces milieux comme transparents, ce qui est discutables en fonction de la longueur d'onde de la lumière étudiée.

Dans les solides, il existe des exemples de milieux non isotropes, dont les propriétés varient en fonction de la direction suivie. Un exemple facilement accessible est l'exemple du carbone graphite :

- Dans les plans où on observe la structure hexagonale, le courant électrique est transporté de proche en proche par délocalisation de paires d'électrons.
- Entre les plans, il n'y a pas de liaisons covalentes, et la distance entre les plans est « grande », il n'y a donc pas de transport possible de l'électricité.



Propriété : Un milieu homogène, isotrope et transparent est caractérisé par un indice optique $n(\lambda_0)$ qui en général dépend de la longueur d'onde dans le vide λ_0 reliée à la fréquence par la relation $\lambda_0 = c/f$ avec c la vitesse de la lumière dans le vide.

Une lumière monochromatique se propage dans un milieu d'indice $n(\lambda_0)$ à la vitesse $v = c/n(\lambda_0)$.

Remarques importantes :

- Lorsque une onde lumineuse monochromatique se transmet dans un milieu d'indice $n(\lambda_0)$, la fréquence de l'onde et la longueur d'onde dans le vide restent inchangées et sont reliées à la couleur de la lumière observée.
- La longueur d'onde dans ce milieu d'indice $n(\lambda_0)$ est alors exprimée par :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{n(\lambda_0)f} = \frac{\lambda_0}{n(\lambda_0)}$$

La longueur d'onde λ diffère donc de la longueur d'onde dans le vide et ne doit pas être reliée directement à la couleur de la lumière observée.

AD 2 : Longueur d'onde et longueur d'onde dans le vide.

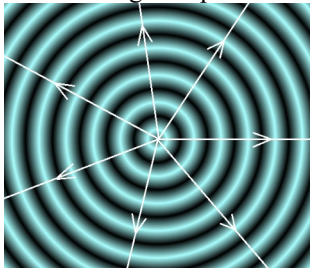
On considère une source de lumière monochromatique qui n'émet de la lumière que pour une unique longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$.

1. Exprimer et évaluer la fréquence de l'onde lumineuse étudiée ainsi que la couleur de cette lumière.
2. Exprimer et évaluer la longueur d'onde associée lorsque cette onde traverse les milieux suivants : de l'air d'indice optique unitaire, de l'eau d'indice optique $n_e = 1,3$, du verre d'indice optique $n_v = 1,5$. Quelle est la couleur observée ?

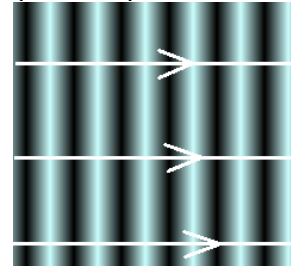
2.2. Introduction des rayons lumineux.

Dans un milieu homogène, la lumière produite se propage radialement à partir du point source monochromatique. On peut alors représenter le chemin suivi par la lumière depuis ce point source vers n'importe quel point du milieu homogène par un rayon lumineux.

➤ Pour un point source situé à distance finie, tous les rayons lumineux divergent à partir de ce dernier.



➤ Pour un point source situé à l'infini, tous les rayons lumineux divergeant du point à l'infini seront localement quasiment parallèles.



Définition : Du point de vue adopté ici, un rayon lumineux sera vu comme la trajectoire suivie par la lumière à partir du point source qui l'a générée jusqu'au point d'observation considéré.

Remarque : Si on inverse les places du point d'observation et du point source, le rayon lumineux qu'on construit alors se superpose avec le rayon lumineux original mais il est parcouru en sens inverse. Cette propriété est conservée quelle que soit la trajectoire envisagée).

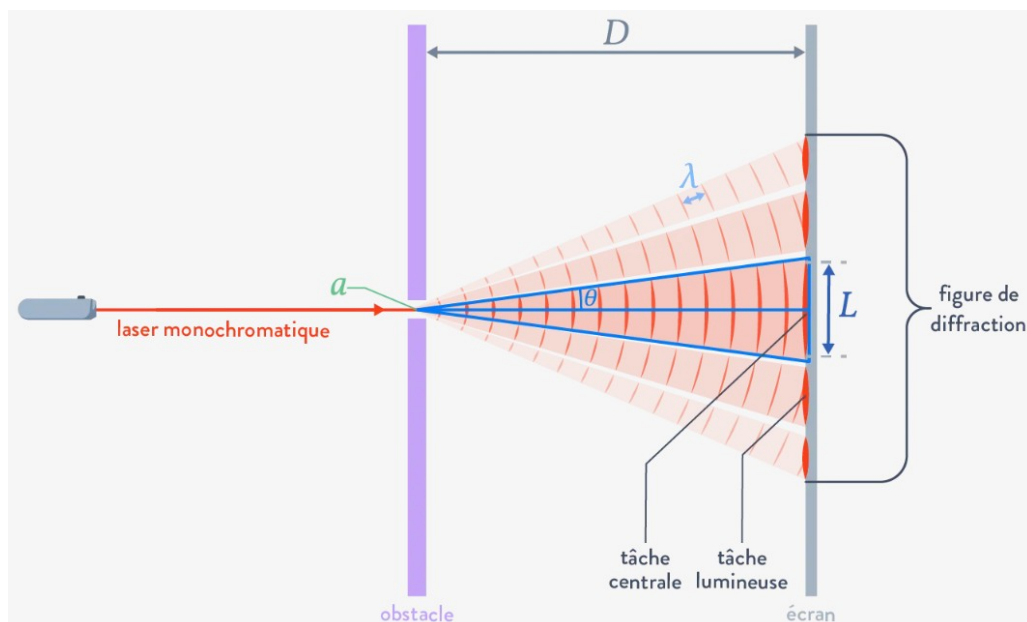
Propriété : On dit que l'optique géométrique est compatible avec le principe de retour inverse de la lumière.

2.3. Domaine de validité de l'optique géométrique.

L'optique géométrique prédit que la lumière traverse un milieu homogène isotrope en ligne droite quel que soit son environnement. Elle traverse donc le trou dans un obstacle en ligne droite comme illustré ci contre.

En réalité, on observe une divergence des rayons lumineux derrière le trou. C'est le phénomène de **diffraction** qui explique cette observation et on peut estimer le demi angle d'ouverture au sommet du cône de lumière central par la relation.

$$\sin \theta \approx \frac{\lambda}{a}$$



Cette observation amène alors à énoncer la **condition de validité de l'optique géométrique** suivante :

L'optique géométrique reste valable à la condition que les dimensions transverses (par exemple le diamètre a du trou) des objets traversés par la lumière restent grandes devant la longueur d'onde dans le vide de la lumière utilisée : $a \gg \lambda$

Capacités exigibles

- Connaître la valeur numérique de la célérité de la lumière dans le vide.
- Caractériser une source lumineuse par son spectre.
- Relier la longueur d'onde dans le vide et la couleur.
- Définir l'indice optique d'un milieu transparent.
- Relier la longueur d'onde dans le vide et dans un milieu transparent.
- Définir le modèle du rayon lumineux et indiquer ses limites.