



Optique instrumentale

Sébastien de Rossi

cours 1

- 21h de cours septembre-décembre
- 1 séance pratique 4h
- 11 Travaux Dirigés d'1h30

Equipe pédagogique

- Sébastien de Rossi enseignant-chercheur
- Guillaume Dupuis enseignant-chercheur
- Eirini Papagiannouli enseignante-chercheuse
- Marie-Anne Burcklen post-doctorante
- Alice Fontbonne post-doctorante
- Agnès Vinoy doctorante

Soutien logistique du LEnsE

Thierry Avignon et Cédric Lejeune

Evaluation

- **1 partiel sur table en novembre**
- **1 examen sur table en janvier**

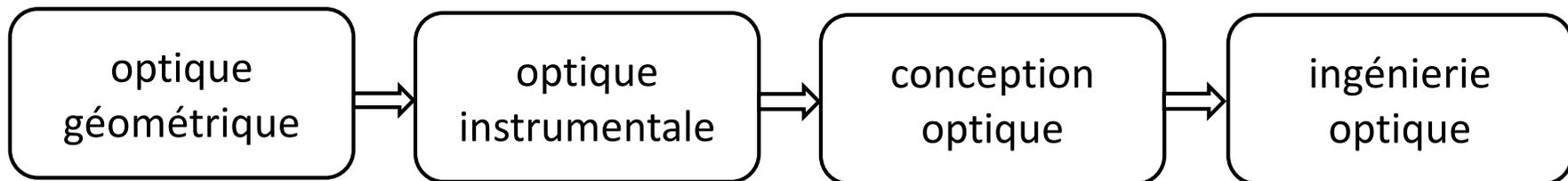
note finale = **MAX** (100% examen ; 50% examen + 50% partiel)

UE optique 1 = Examen OI 80% + TP focométrie 20%

Objectifs pédagogiques

Savoir esquisser/dimensionner un système optique formant des images en se basant sur un modèle géométrique de la lumière et dans le cadre de l'optique paraxiale.

Ce cours sert de prérequis fondamental pour la conception optique abordée en 2^{ème} année.



1. Acquis et fondamentaux
2. Stigmatisme, approximation linéaire
3. Propriétés des systèmes optiques
4. Introduction à la photométrie

Documents pédagogiques

lense.institutoptique.fr/optique-instrumentale-s5/

notes de cours

sujets et corrigés des TDs

sujets examens passés

...



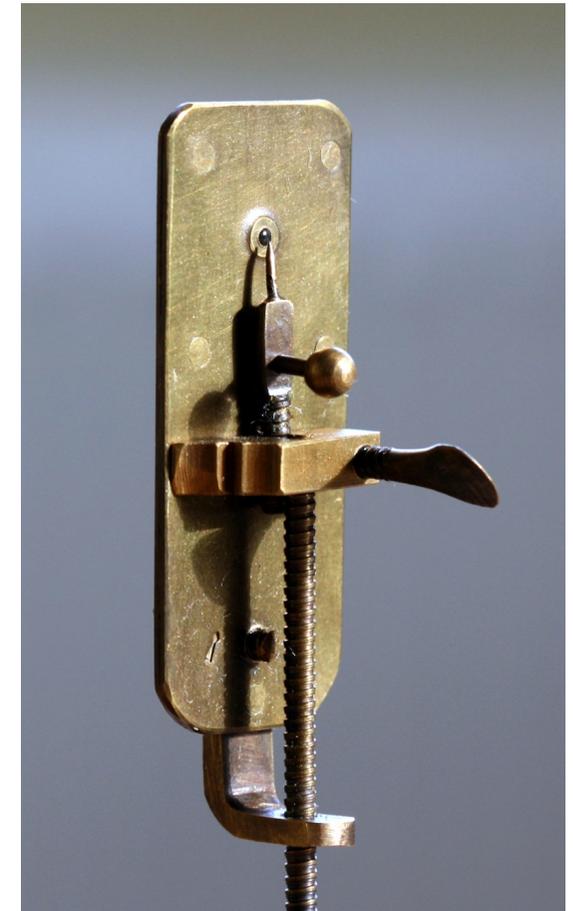
Optique instrumentale historique



amélioration de la lunette dioptrique
Galilée, 1609
©Leemage



télescope à miroirs
Newton, 1671
©Andrew Dunn

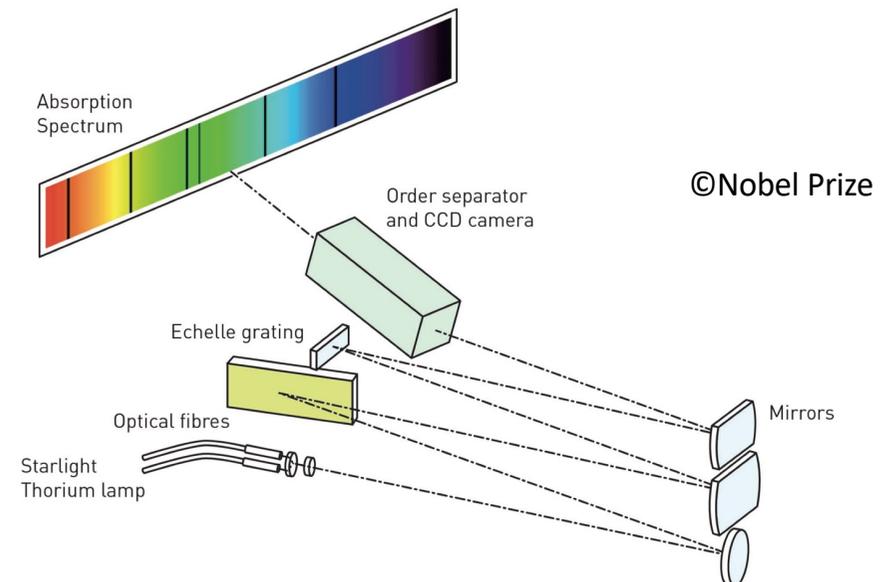
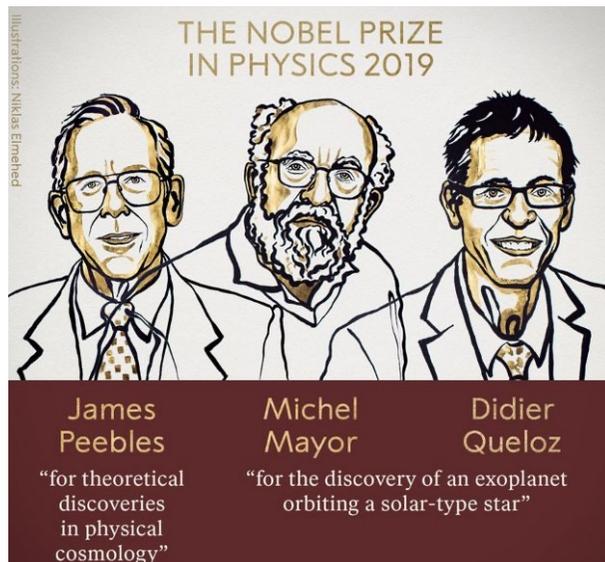
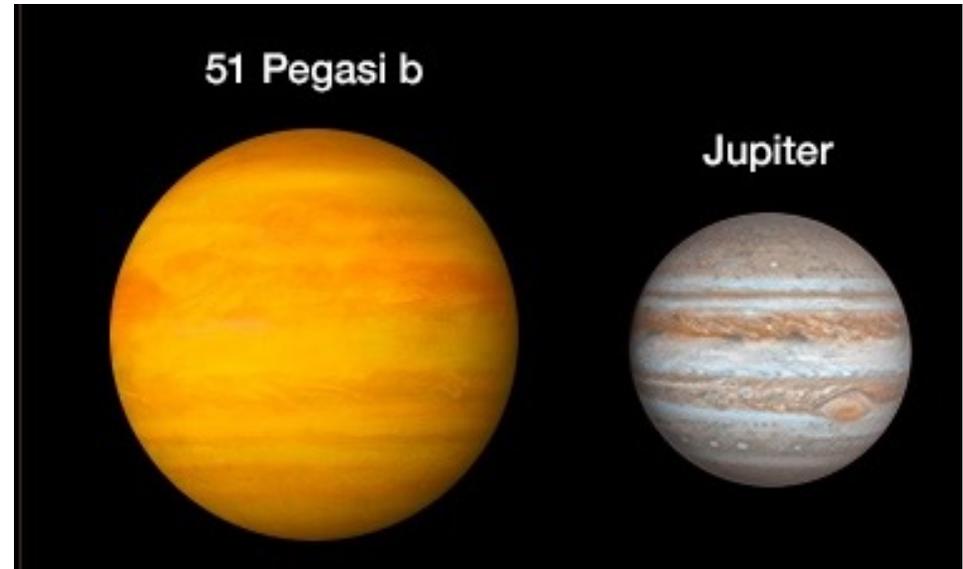


amélioration du microscope
(lentille biconvexe $\times 30$)
Antoni van Leeuwenhoek, 1674
©Jeroen Rouwkema

Optique instrumentale moderne

**1^{ère} détection
d'une exoplanète (51 AL)**
Observatoire de Haute Provence
1995

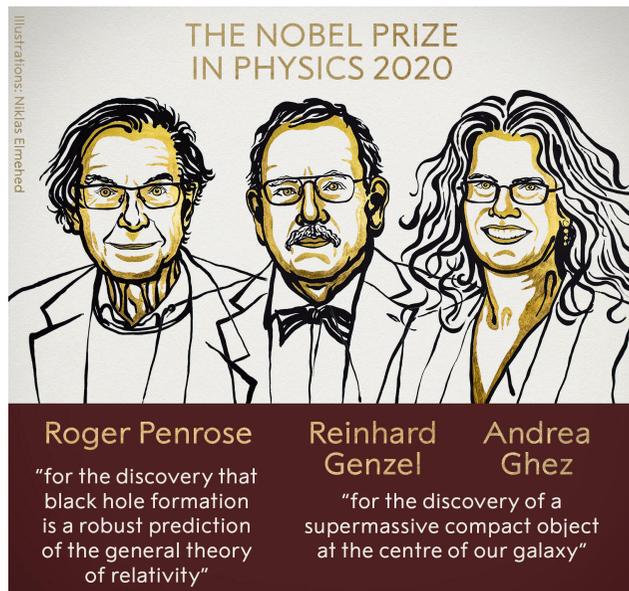
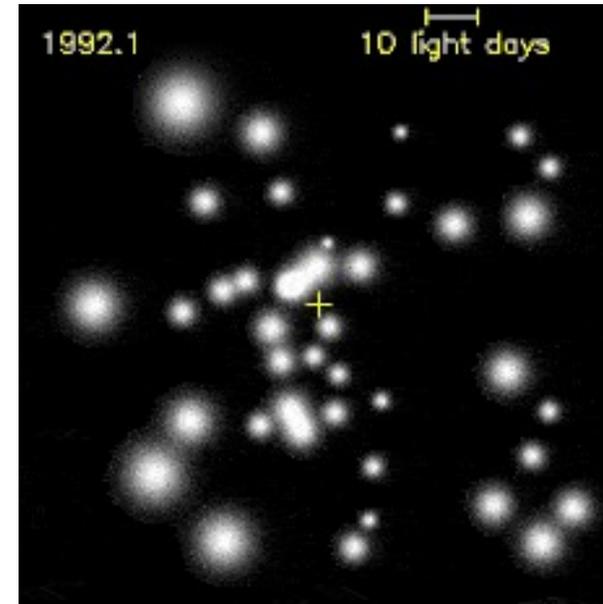
*spectroscopie des vitesses radiales
de l'étoile hôte
(effet Doppler)*



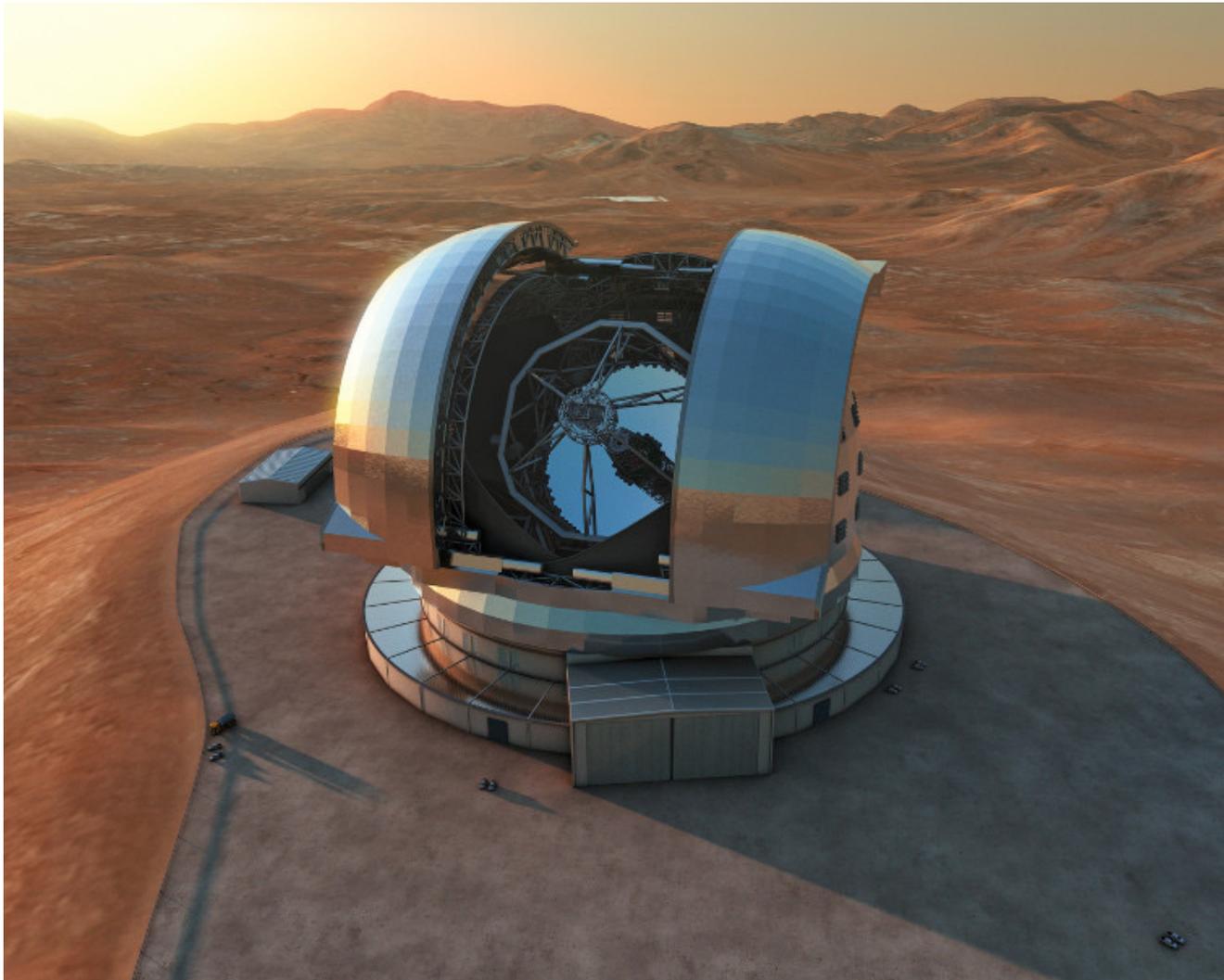
Optique instrumentale moderne

détection directe du trou noir central de notre galaxie(26673 AL)

*Imagerie très haute résolution
par interférométrie et optique adaptative*
Very Large Telescope



Optique instrumentale moderne



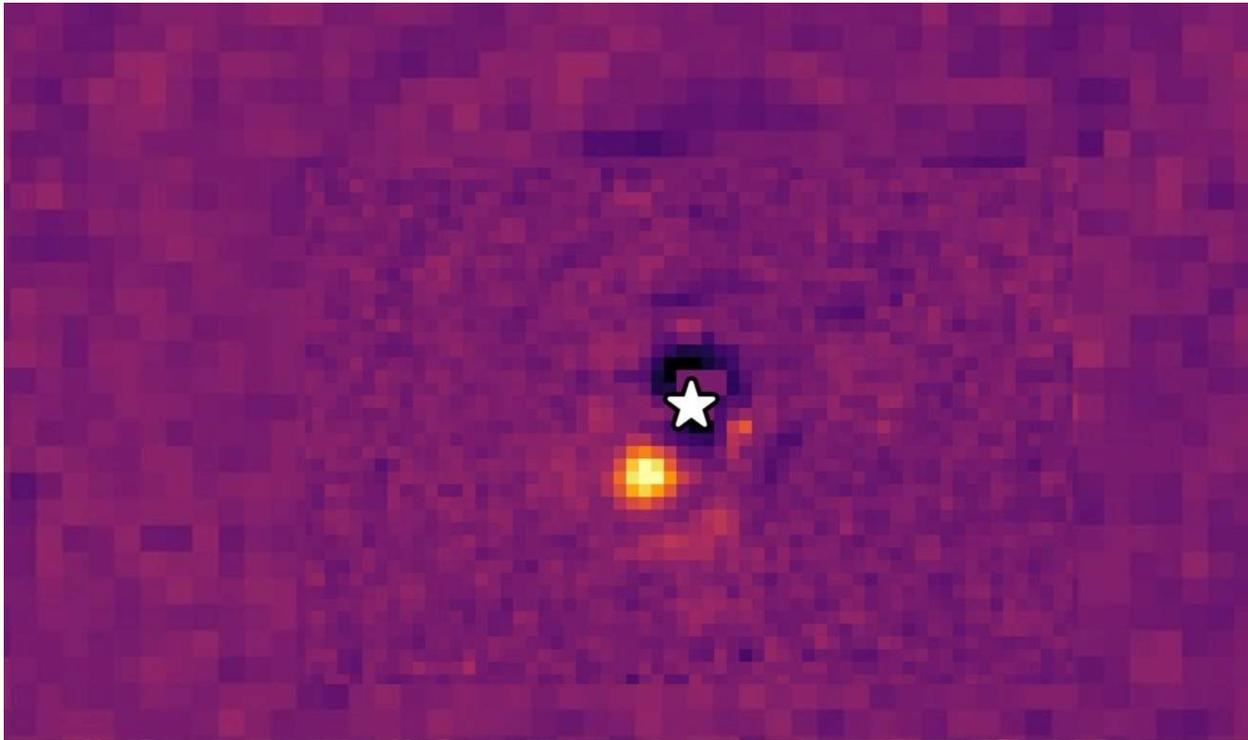
European Extremely Large Telescope
primaire 39 m – 2024

©ESO



James Webb Space Telescope
primaire 8 m

©NASA



JWST
©NASA

 Earth to scale



esa

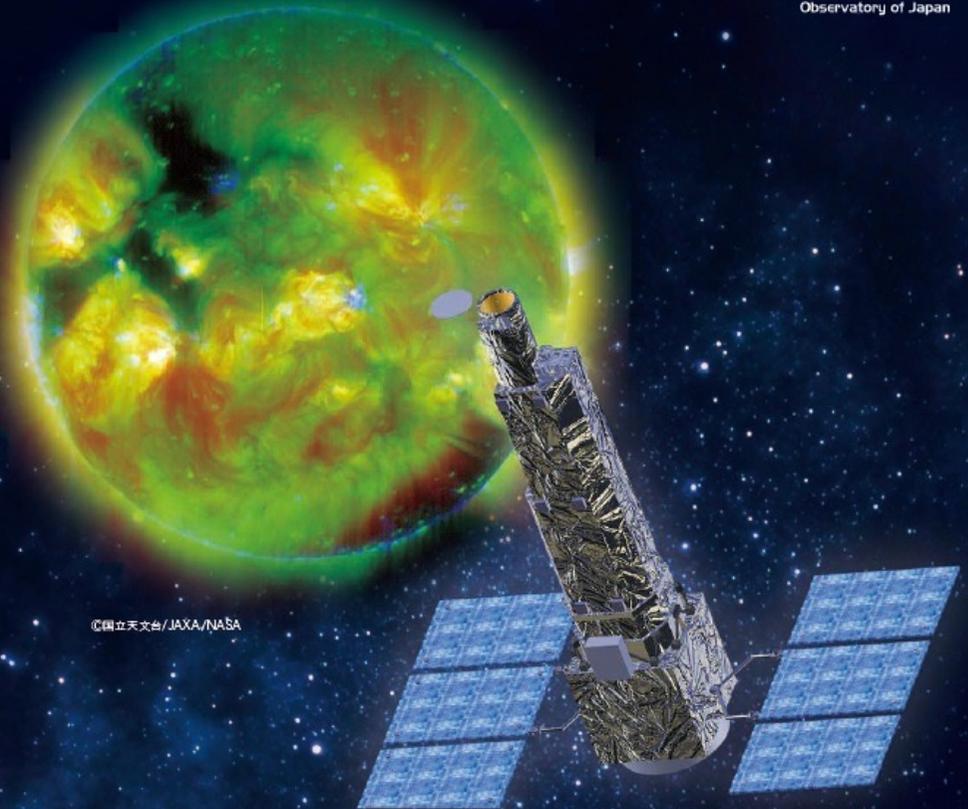
solar orbiter

→ THE SUN UP CLOSE



lancement février 2020

国立天文台
NAOJ
National Astronomical
Observatory of Japan



©国立天文台/JAXA/NASA

©国立天文台/JAXA (Solar-C WG)

プラズマに満ちた宇宙はどのようにつくられ、進化したのか？
太陽はどのように地球や惑星に影響を及ぼしているのか？

高温のコロナや太陽風はどうやってつくられるのか？
太陽フレアは、いつ、どのようにして起こるのか？

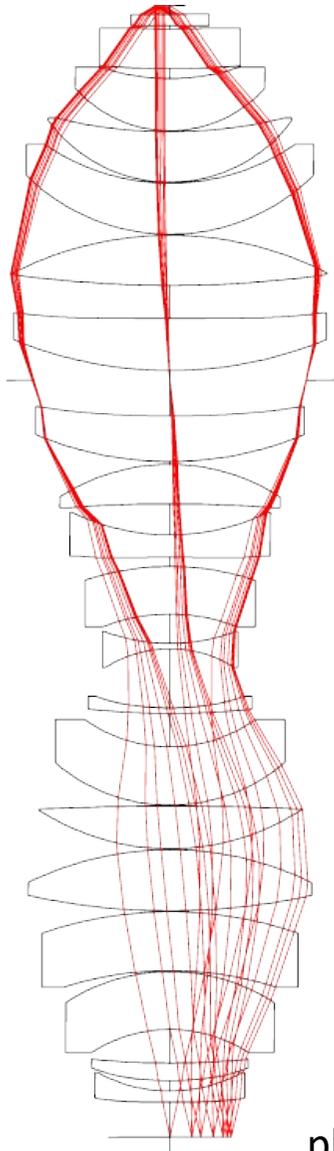
2020年代半ばの打ち上げを目指すSolar-C_EUVSTは、
彩層からコロナまでを広い温度帯にわたって隙間なく分光観測し、
物質とエネルギーの流れをとらえることで、これらの謎に迫ります。

次期太陽観測衛星

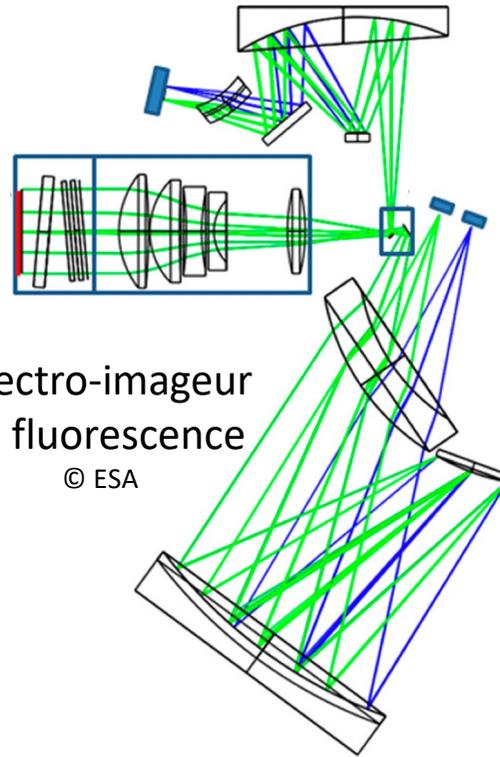
Solar-C_EUVST

lancement septembre 2027

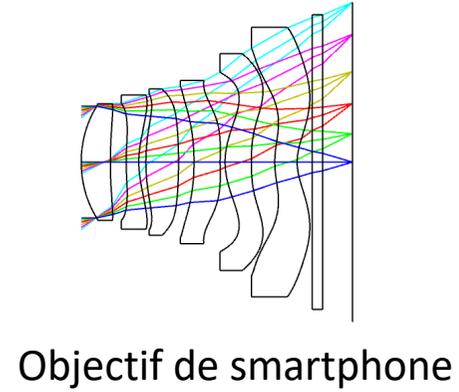
Optique instrumentale moderne



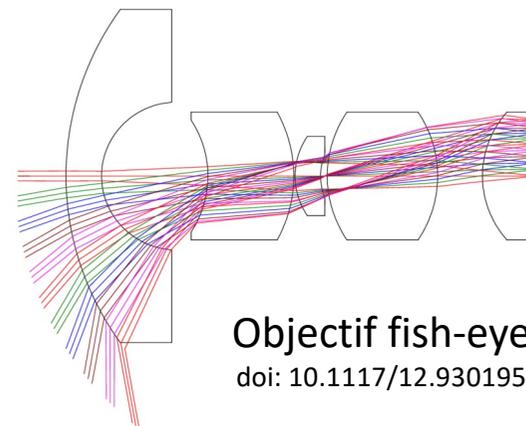
Objectif pour la photolithographie à 193 nm
© ZEISS



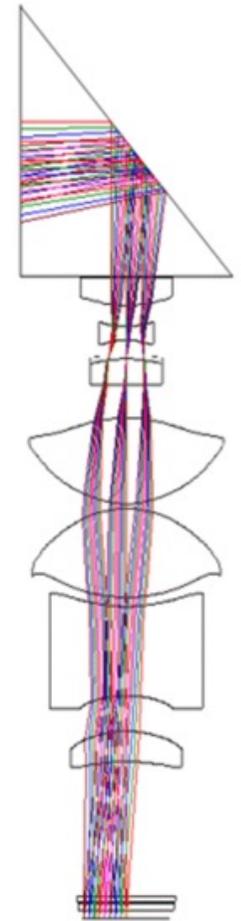
Spectro-imageur de fluorescence
© ESA



Objectif de smartphone

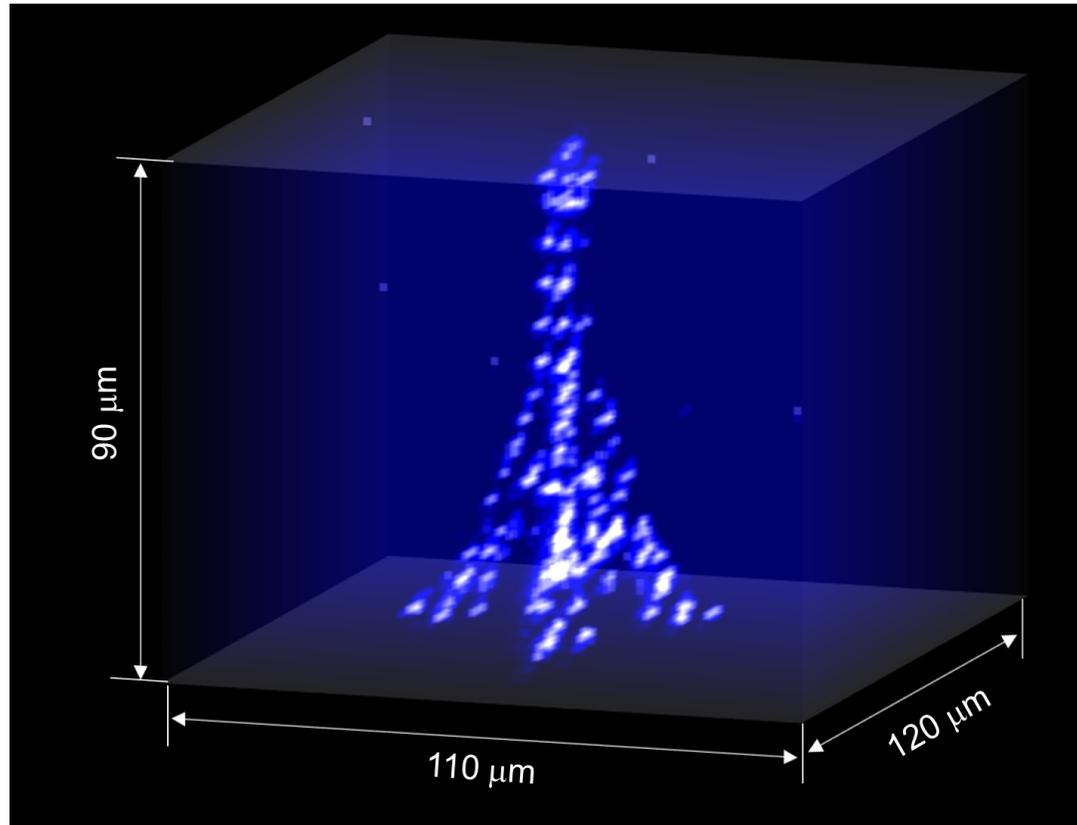


Objectif fish-eye
doi: 10.1117/12.930195



Périscope

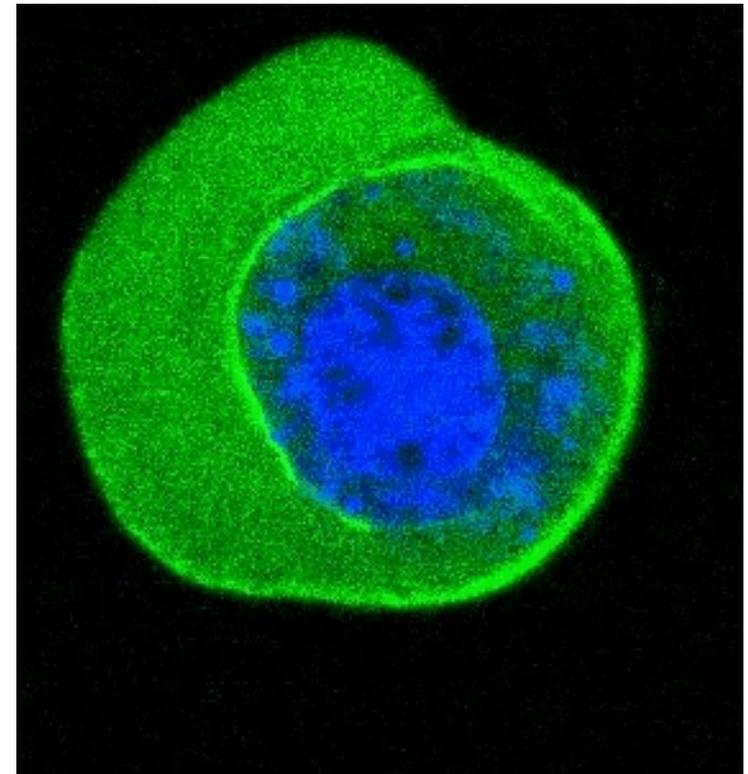
Optique instrumentale moderne



pinces optiques
pour les calculateurs quantiques

© IOGS/LCF groupe optique quantique
<https://atom-tweezers-io.org>

 **PASQAL** start-up IOGS/LCF



pinces optiques
pour les sciences du vivant

© impetus



Optique instrumentale moderne

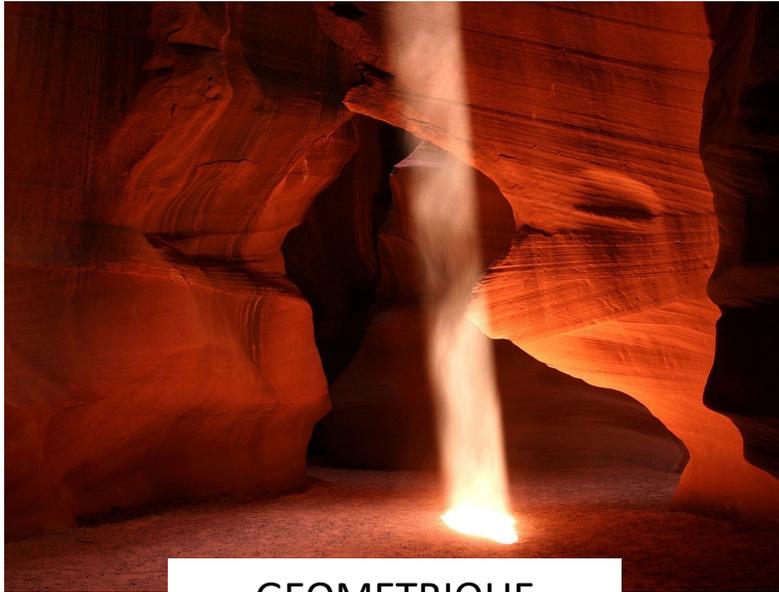


concentrateur solaire (1000° au foyer)
©Wahaj Solar / Émirats Arabes Unis

Optique instrumentale moderne



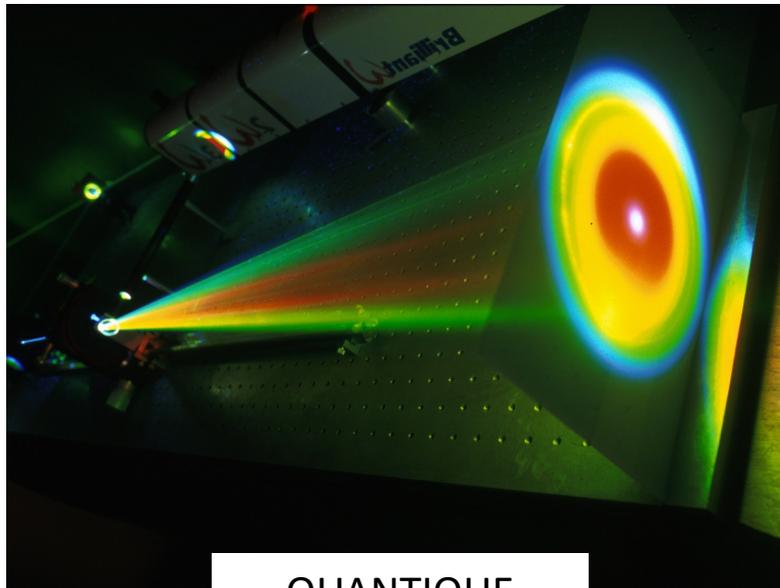
art, éclairage et apparence



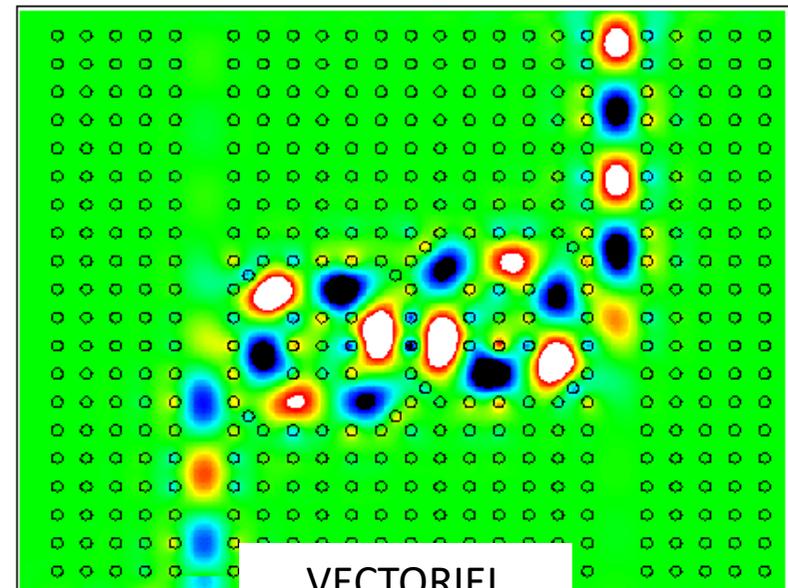
GEOMETRIQUE



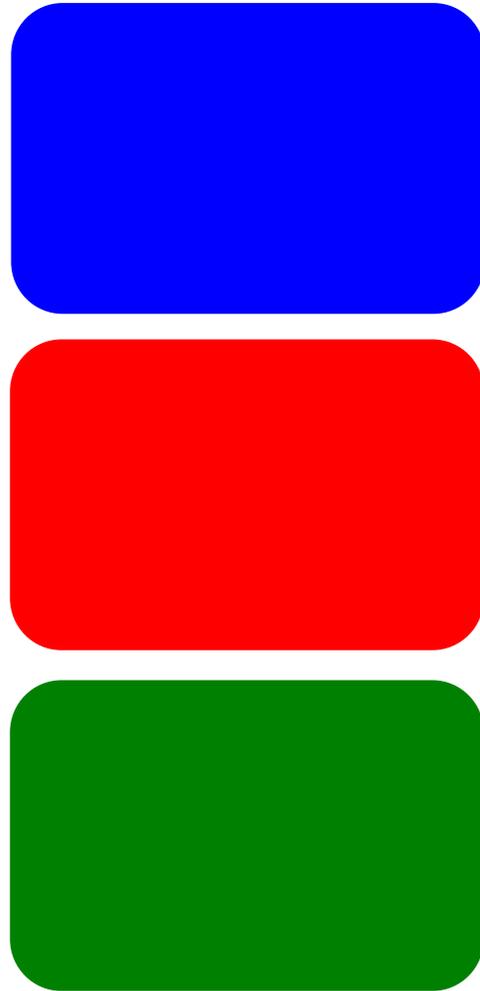
ONDULATOIRE



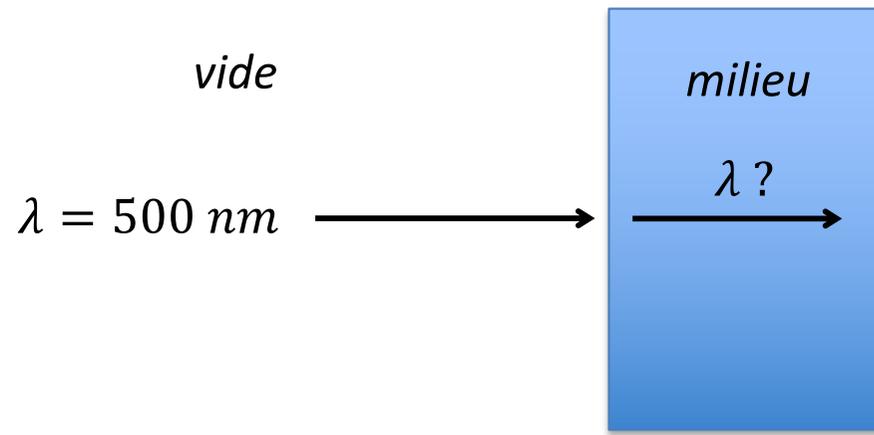
QUANTIQUE



VECTORIEL



Quelle est la longueur d'onde dans le milieu d'indice $n = 2$?



1

500 nm

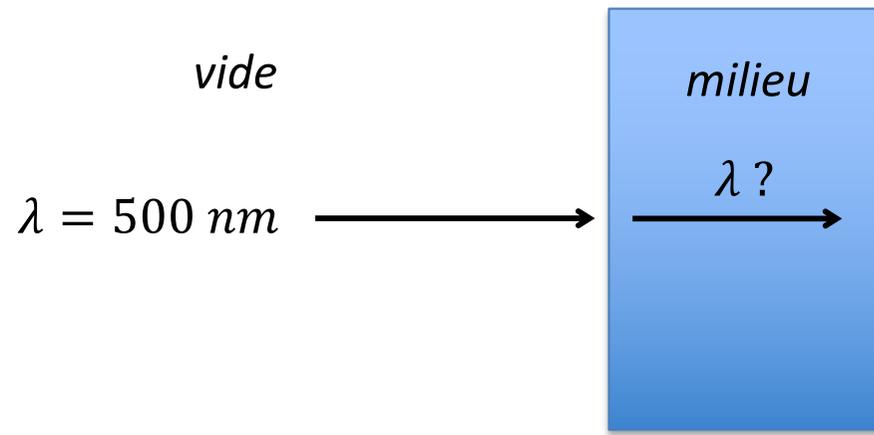
2

1000 nm

3

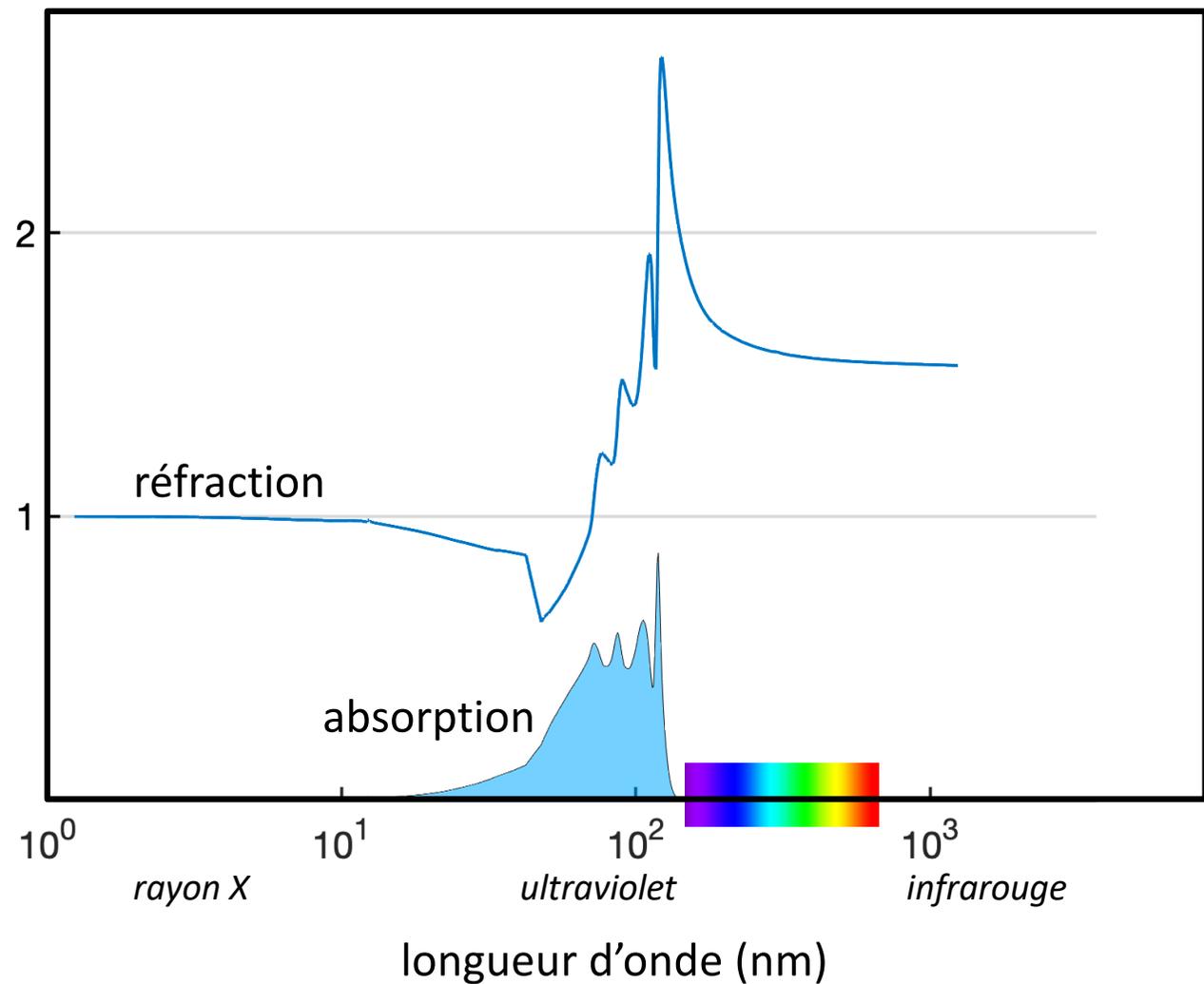
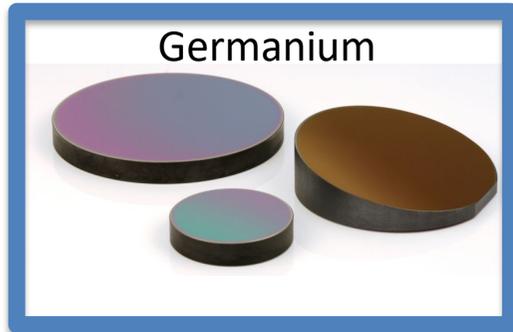
250 nm

Quelle est la longueur d'onde dans le milieu d'indice $n = 2$?

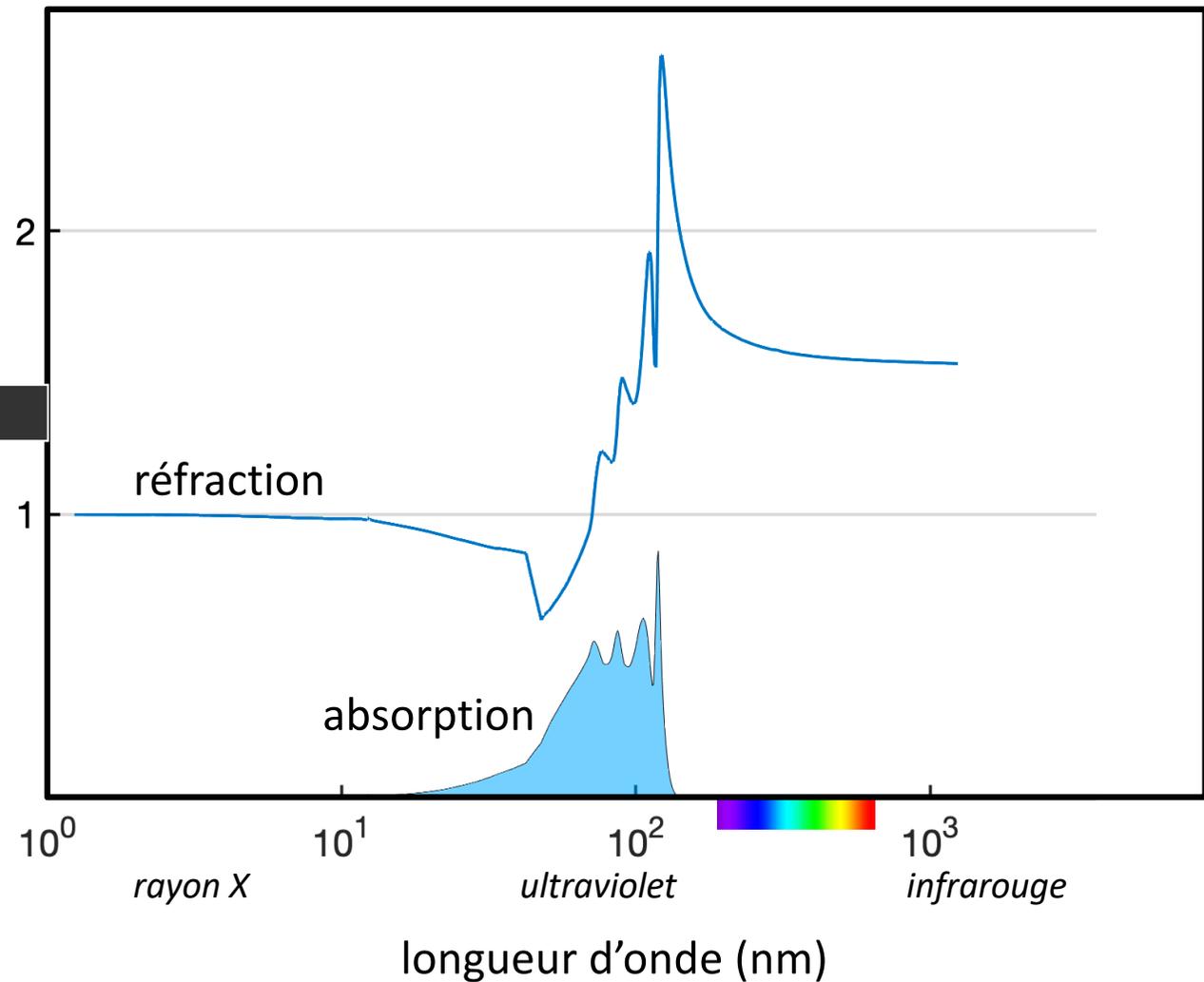
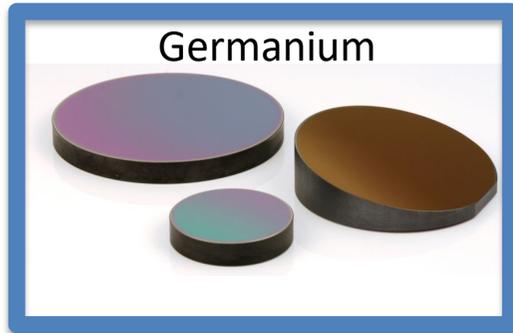


- 1 500 nm
- 2 1000 nm
- 3 250 nm

A quel matériau appartient cet indice ?



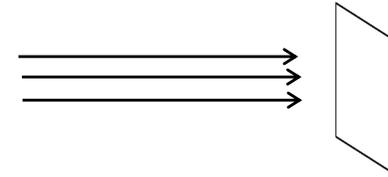
A quel matériau appartient cet indice ?



Comment arrivent les rayons sur un écran provenant d'une source ponctuelle placée à l'infini ?

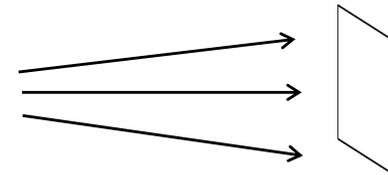
1

parallèles



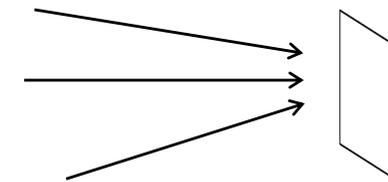
2

sortants

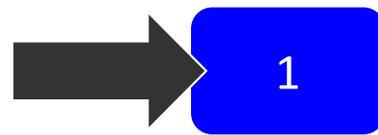


3

entrants



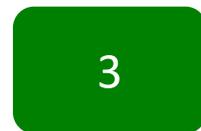
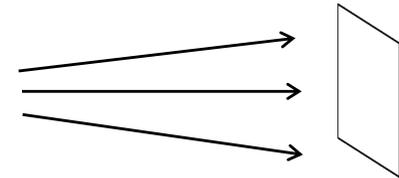
Comment arrivent les rayons sur un écran provenant d'une source ponctuelle placée à l'infini ?



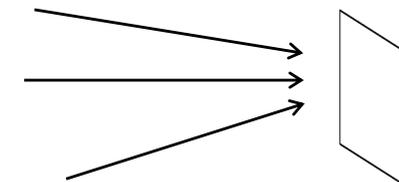
parallèles



sortants



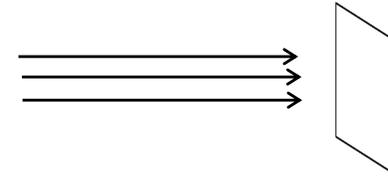
entrants



Comment arrivent les rayons sur un écran provenant d'une source étendue placée à l'infini ?

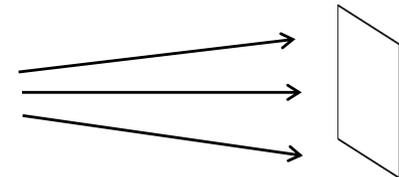
1

parallèles



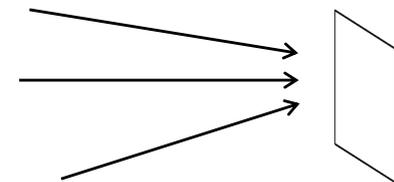
2

sortants

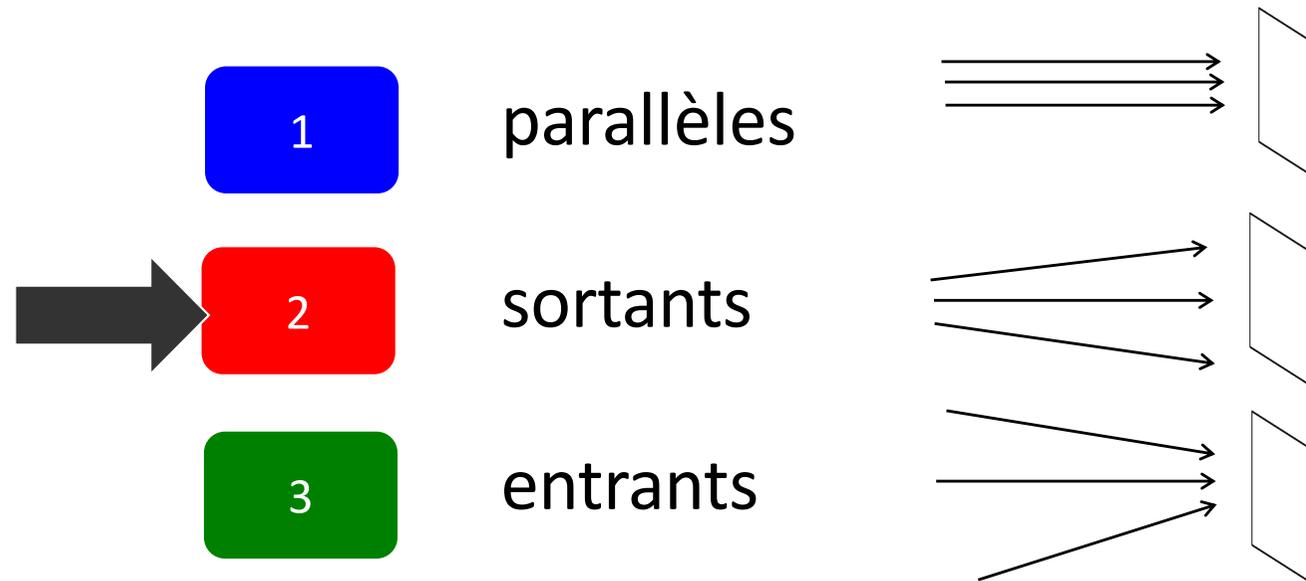


3

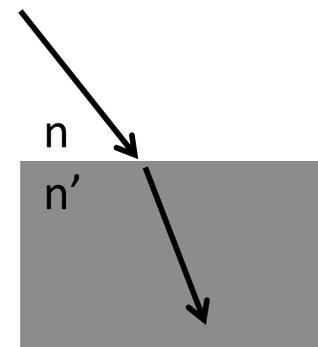
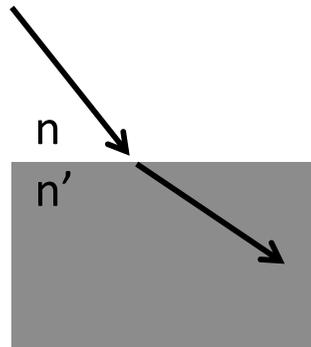
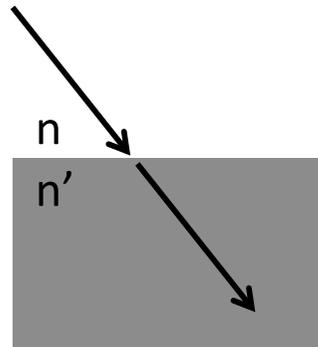
entrants



Comment arrivent les rayons sur un écran provenant d'une source étendue placée à l'infini ?



Un rayon traverse un dioptre plan séparant deux milieux d'indice n et $n' > n$. Quel est le bon trajet ?

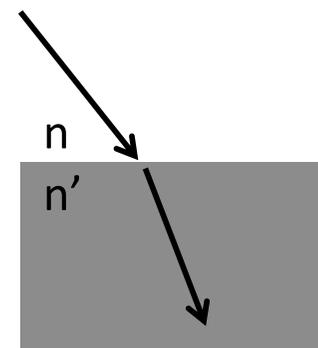
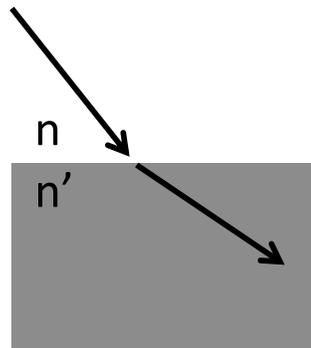
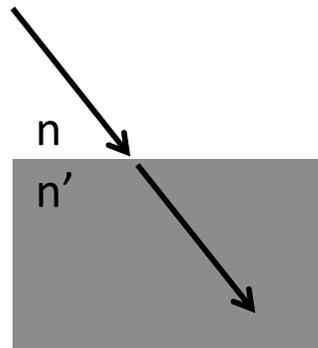


1

2

3

Un rayon traverse un dioptre plan séparant deux milieux d'indice n et $n' > n$. Quel est le bon trajet ?



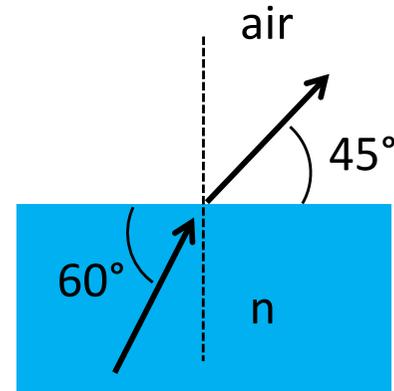
1

2

3



Que vaut l'indice du milieu n dans la configuration suivante ?



1

$\sqrt{2}$

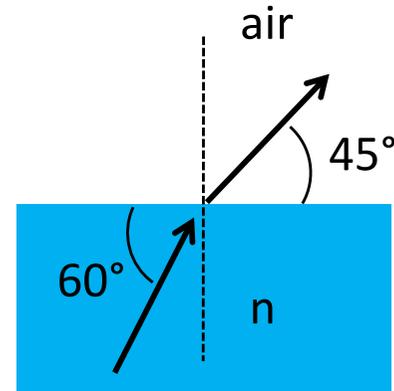
2

$\sqrt{3/2}$

3

$\sqrt{2/3}$

Que vaut l'indice du milieu n dans la configuration suivante ?



- 1 $\sqrt{2}$
- 2 $\sqrt{3/2}$
- 3 $\sqrt{2/3}$

Un rayon lumineux arrive sur une lame de verre à faces parallèles d'indice n avec un angle d'incidence i .

Quel est l'angle i' d'émergence du rayon après avoir traversé toute la lame ?

1

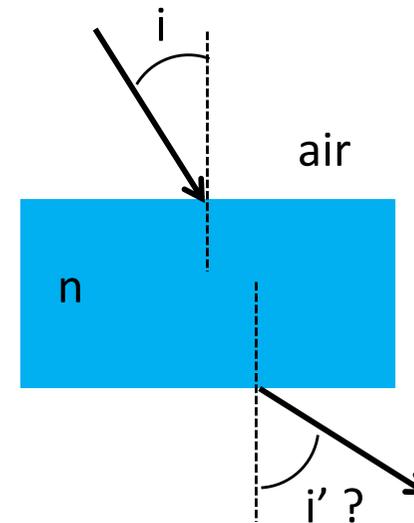
$$i' < i$$

2

$$i' = i$$

3

impossible à calculer car n est inconnu



Un rayon lumineux arrive sur une lame de verre à faces parallèles d'indice n avec un angle d'incidence i .

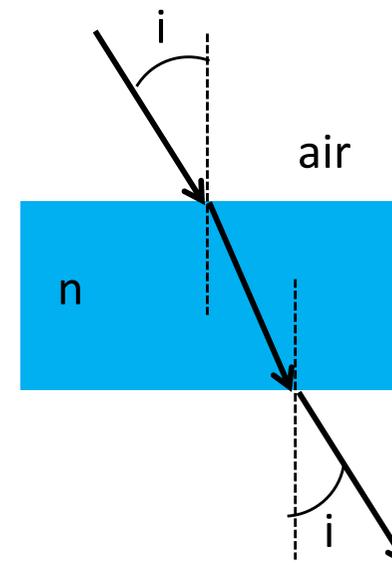
Quel est l'angle i' d'émergence du rayon après avoir traversé toute la lame ?

- 1
- 2
- 3

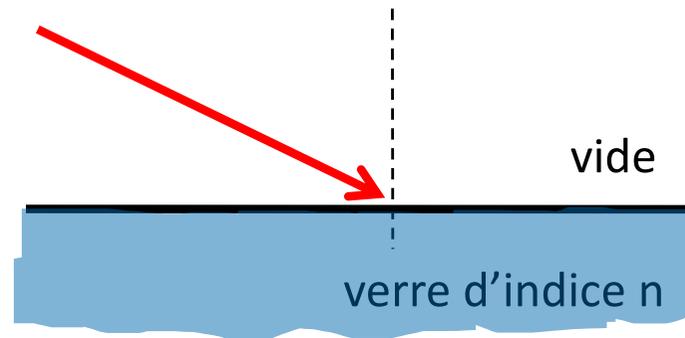
$$i' < i$$

$$i' = i$$

impossible à calculer car n est inconnu



Une interface vide-verre peut-elle réfléchir 100% de la lumière ?



1

toujours

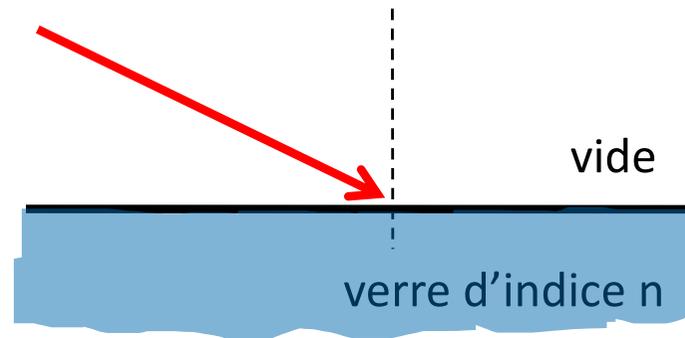
2

jamais

3

possible si $n < 1$

Une interface vide-verre peut-elle réfléchir 100% de la lumière ?



- 1 toujours
- 2 jamais
- 3 possible si $n < 1$

En incidence quasi normale quel % de lumière visible est réfléchi à une interface air-verre ($n=1,5$) ?

1

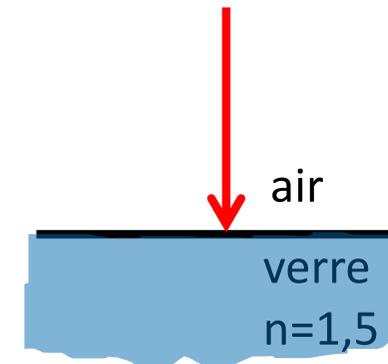
~ 50%

2

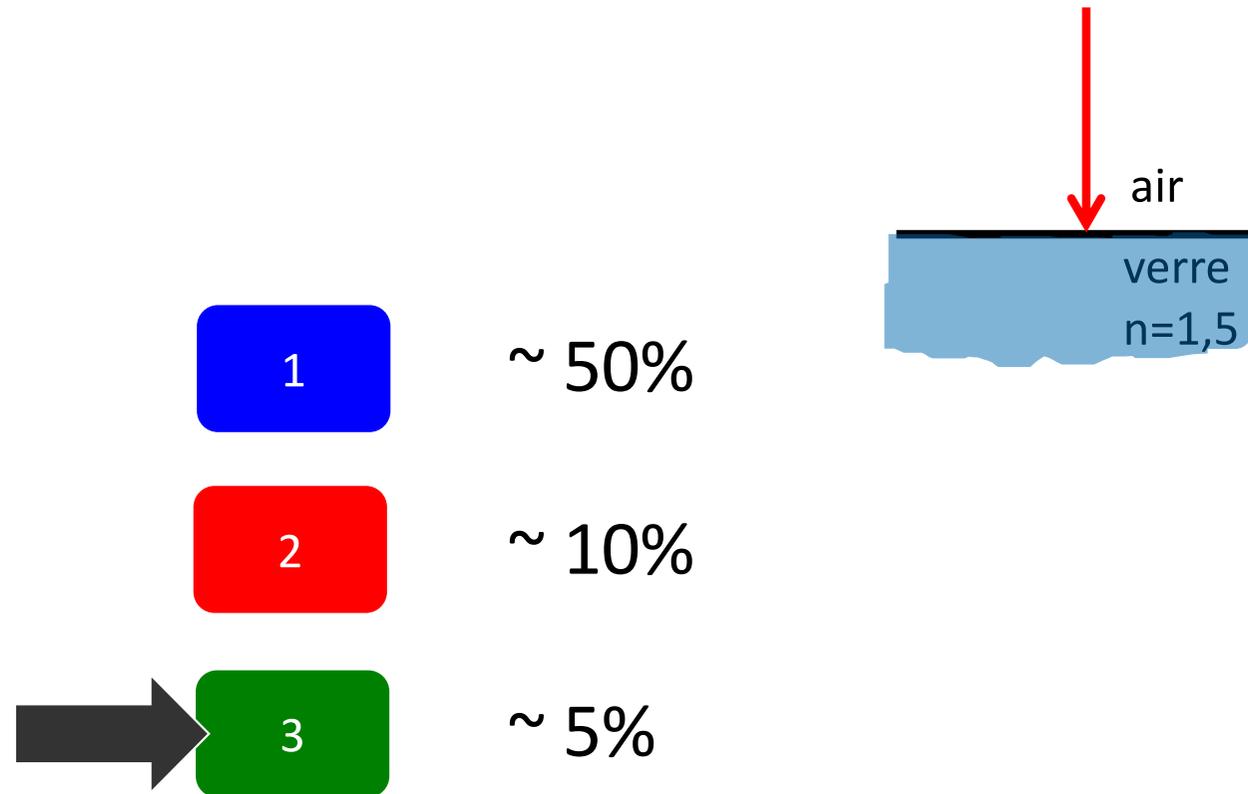
~ 10%

3

~ 5%



En incidence quasi normale quel % de lumière visible est réfléchi à une interface air-verre ($n=1,5$) ?



Pourquoi voyez-vous ces ondulations ?

1

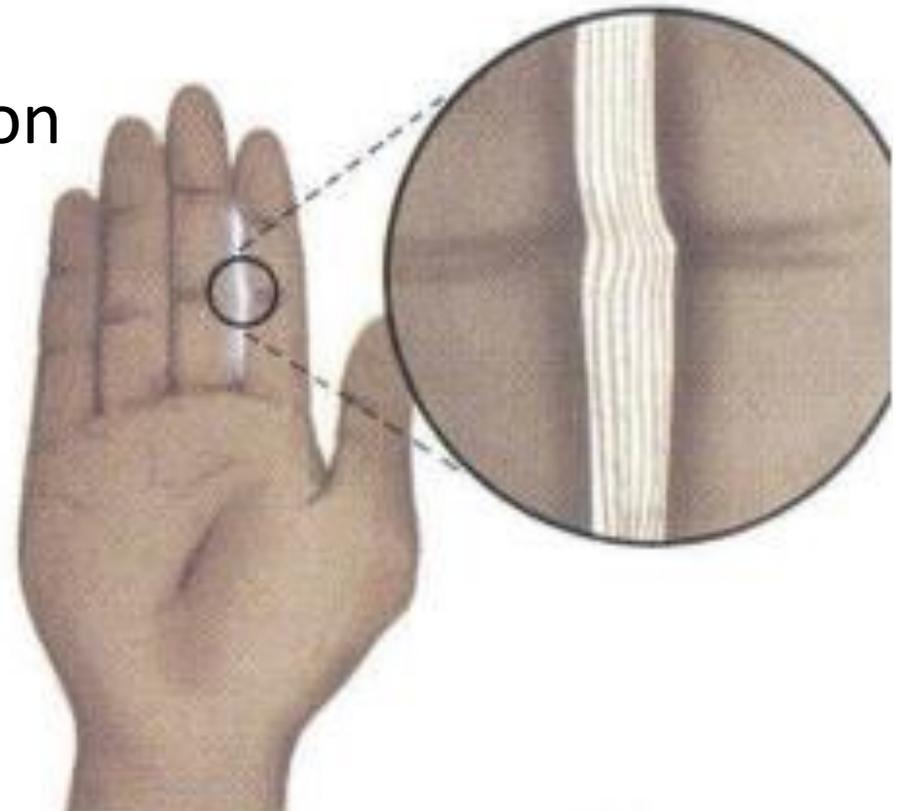
effet thermique de la couche d'air

2

diffraction entre les doigts

3

épiderme en transmission



Pourquoi voyez-vous ces ondulations ?

1

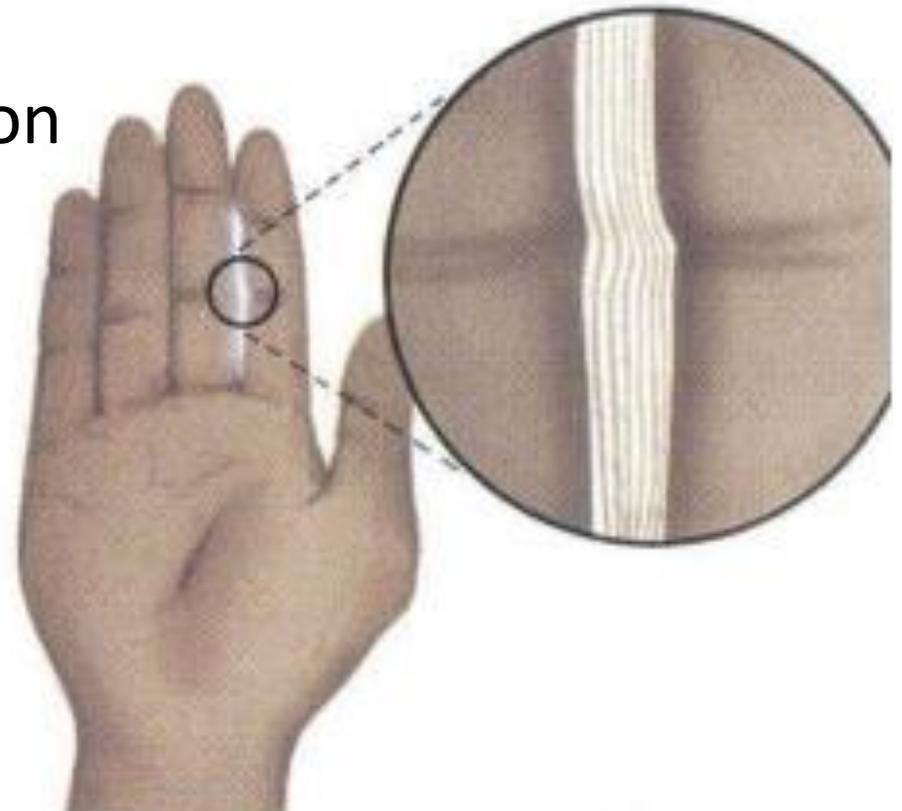
effet thermique de la couche d'air

2

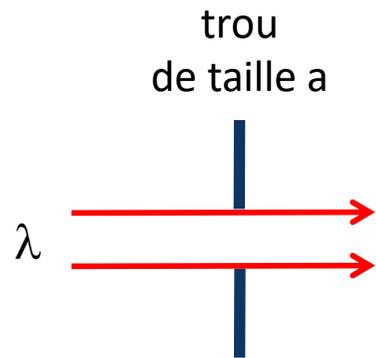
diffraction entre les doigts

3

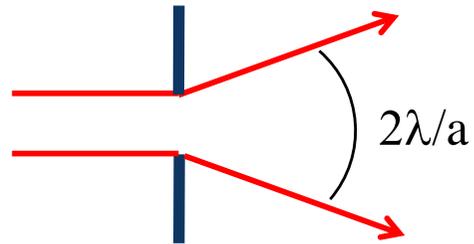
épiderme en transmission



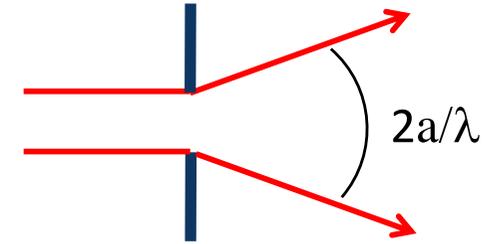
Quelle est la bonne description ?



1

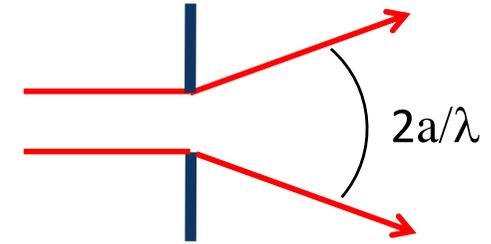
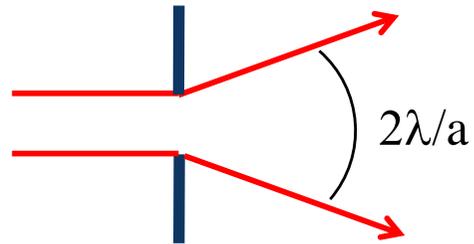
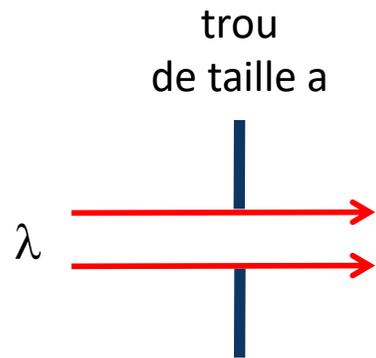


2



3

Quelle est la bonne description ?



1

2

3



Pourquoi voit-on un disque de lumière quand on est sous l'eau ?



1

absorption de l'eau

2

phénomène lié à la réflexion totale

3

diffusion angulaire

Pourquoi voit-on un disque de lumière quand on est sous l'eau ?



1

absorption de l'eau

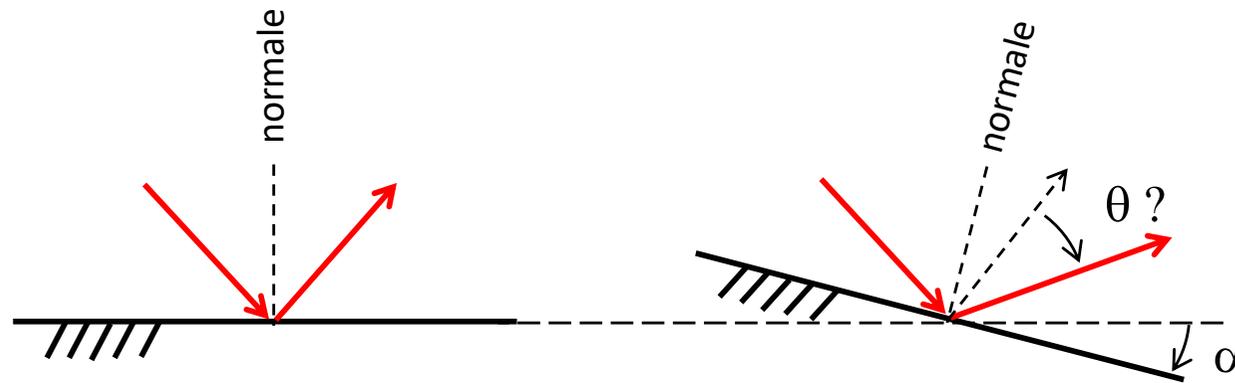
2

phénomène lié à la réflexion totale

3

diffusion angulaire

Que vaut θ ?



1

α

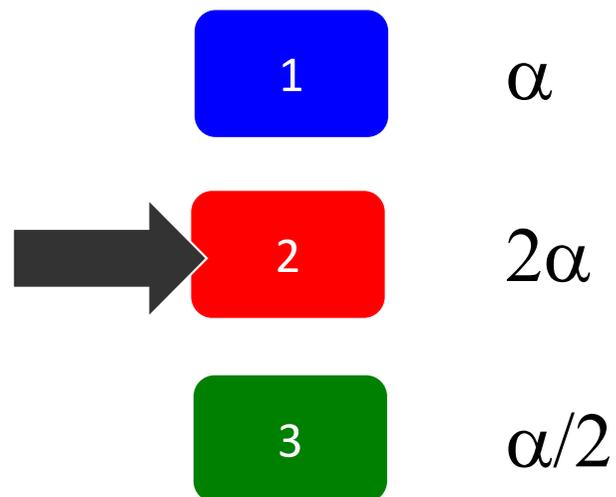
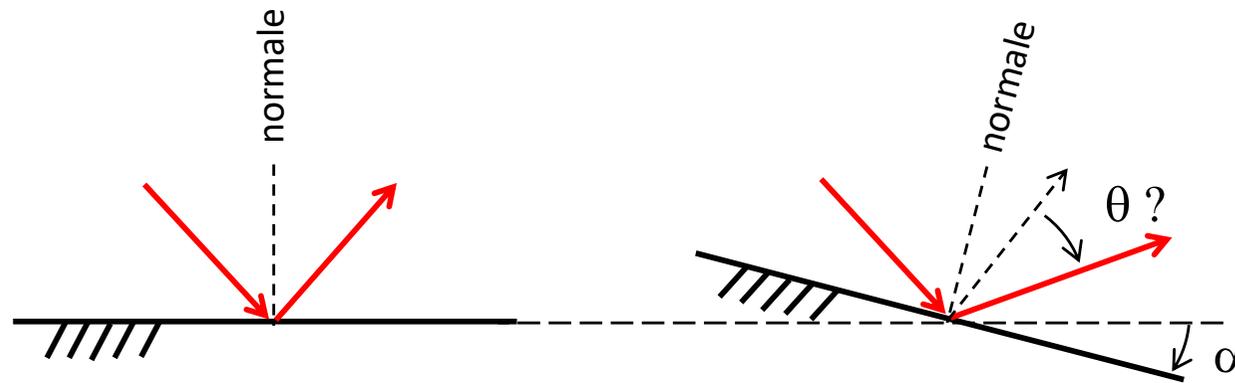
2

2α

3

$\alpha/2$

Que vaut θ ?



Où est l'image virtuelle ?

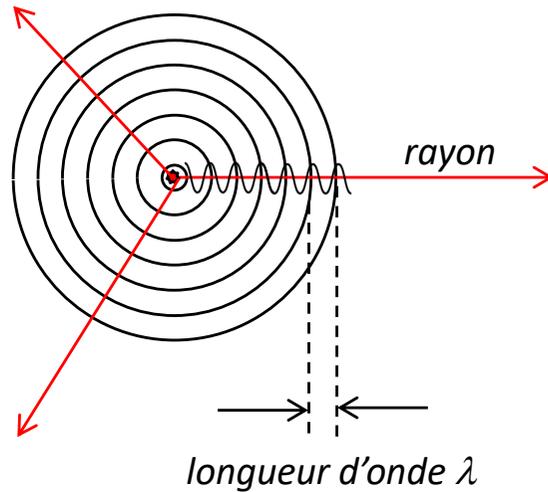


Où est l'image virtuelle ?

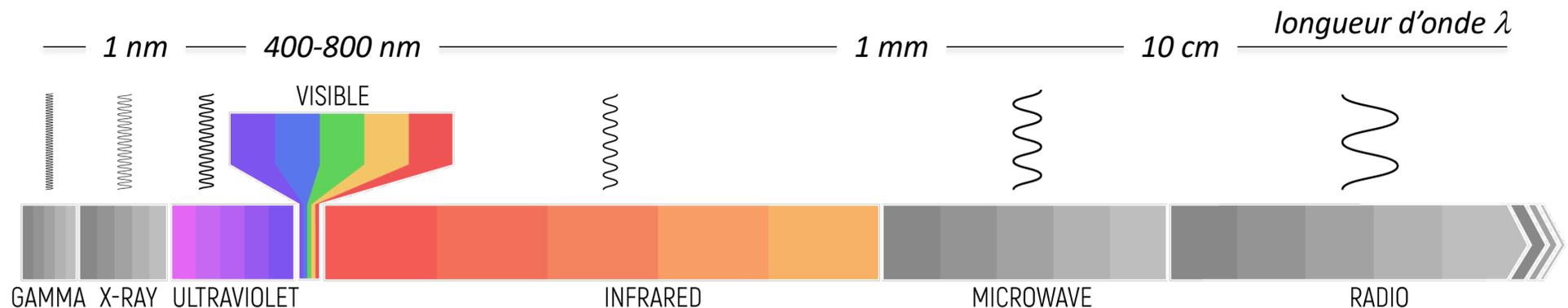


éléments
introductionnels

front d'onde sphérique
émis par une source ponctuelle

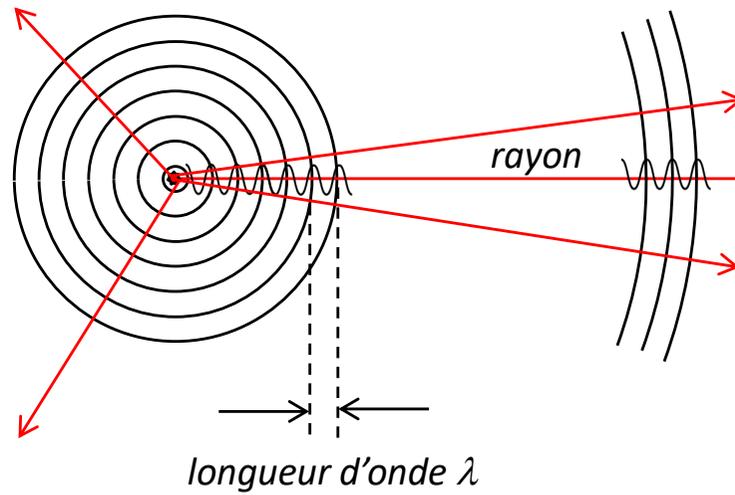


La lumière est une **onde transversale** se propageant à la vitesse v_{vide} de 300.000 km/s dans le vide. La période spatiale de l'onde s'appelle la **longueur d'onde** λ . Le **front d'onde** (ou surface d'onde) est l'ensemble des points d'égale perturbation lumineuse. Le **rayon** décrit la direction de l'énergie lumineuse. Rayons et fronts d'onde sont orthogonaux. La **polarisation** décrit la direction d'oscillation de l'onde.

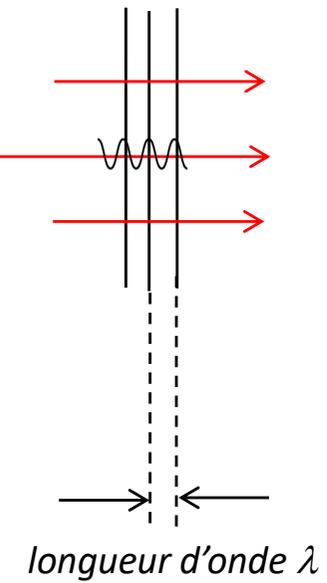


Rayons et fronts d'onde

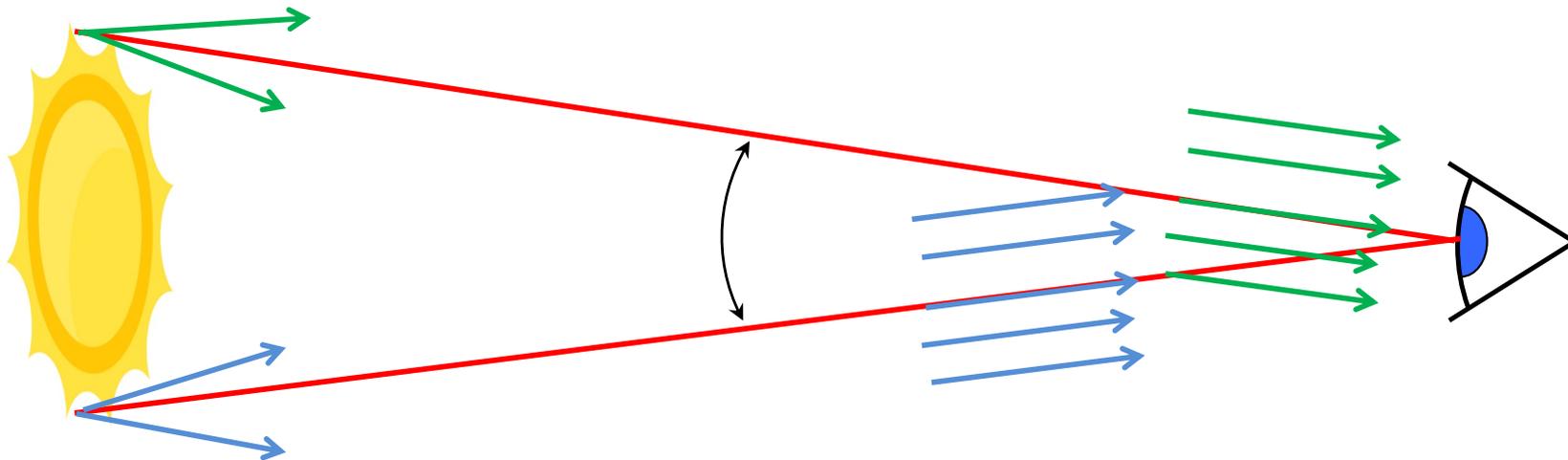
*front d'onde sphérique
émis par une source ponctuelle*



*rayons parallèles et front d'onde plan
émis par une source ponctuelle à l'infini*



Un objet situé à l'infini (ou quasi) est défini par l'angle apparent sous lequel on le voit à l'œil nu ou à travers un instrument. On parle de taille apparente ou taille angulaire.



Le Soleil et la Lune sont vus sous $0,5^\circ$ depuis la Terre.

Le milieu de propagation

L'indice optique caractérise l'interaction entre le milieu et la lumière qui s'y propage. Il dépend de l'espace, des paramètres physiques du milieu (pression, température...), de la polarisation et la longueur d'onde de la lumière.

- Le vide a un indice de 1 quelque soit la longueur d'onde
- L'air a un indice de 1,0003 dans le visible
- Le verre (optique) a un indice proche de 1,5 dans le visible.
- Le germanium a un indice de 4 dans l'IR
- Dans les rayons X l'indice d'un matériau est inférieur à 1

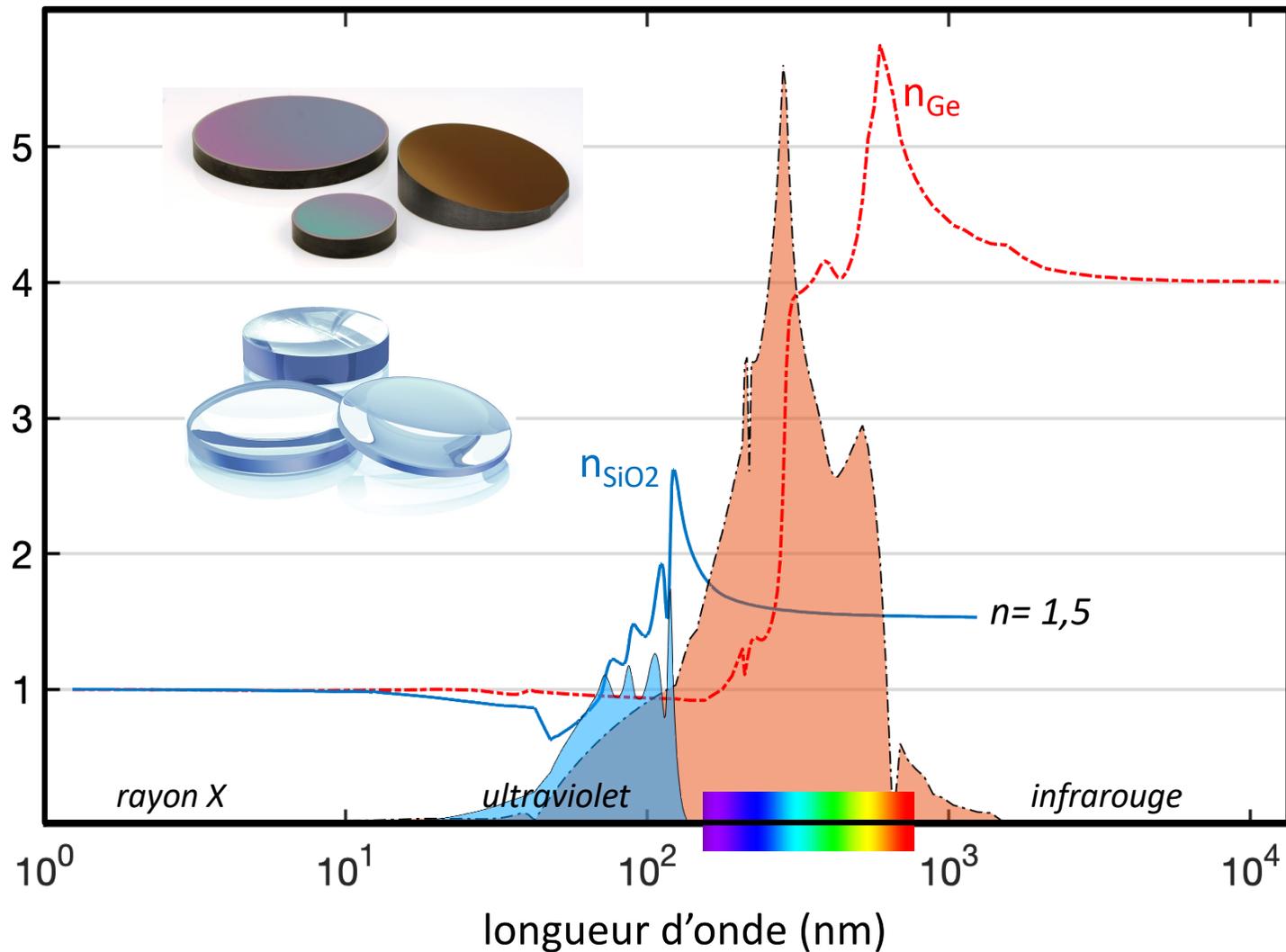
L'indice contient une partie notée n qui impacte la propagation de la lumière (déviation des rayons) et une partie notée β qui décrit l'absorption du milieu.

La vitesse (de phase) d'une onde est modifiée dans un milieu tel que $v_n = \frac{v_{vide}}{n}$

La fréquence lumineuse est invariante dans un milieu. Seule sa longueur d'onde change tel que $\lambda_n = \frac{\lambda_{vide}}{n}$

Le milieu de propagation

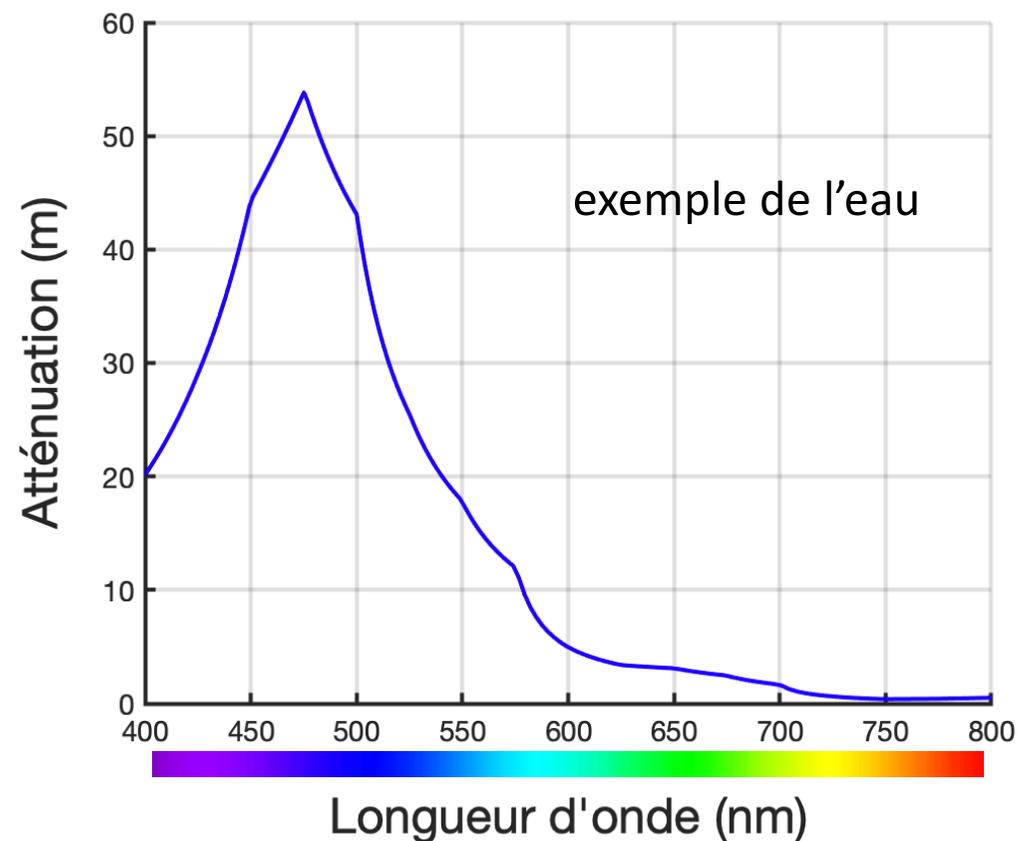
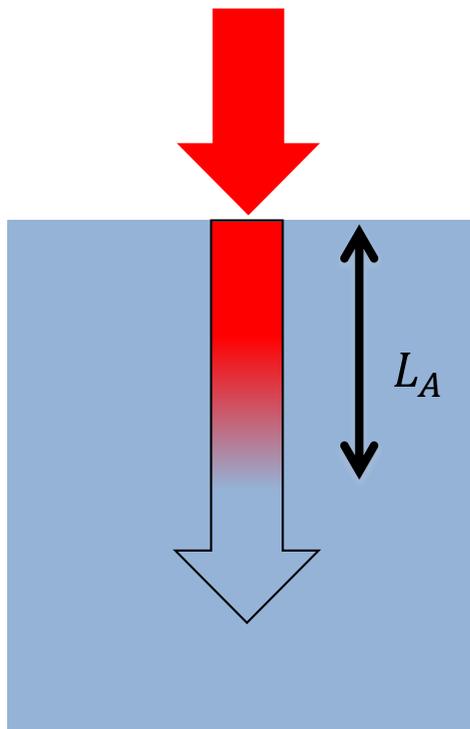
Exemple : indice optique de la silice et du Germanium (à pression et température ambiante)



Le milieu de propagation

La partie β de l'indice permet de déterminer l'atténuation en profondeur L_A d'une onde lumineuse de longueur d'onde λ . C'est la profondeur à partir de laquelle la majorité du flux lumineux est absorbé.

$$L_A = \frac{\lambda}{4\pi \times \beta}$$



Propagation de la lumière

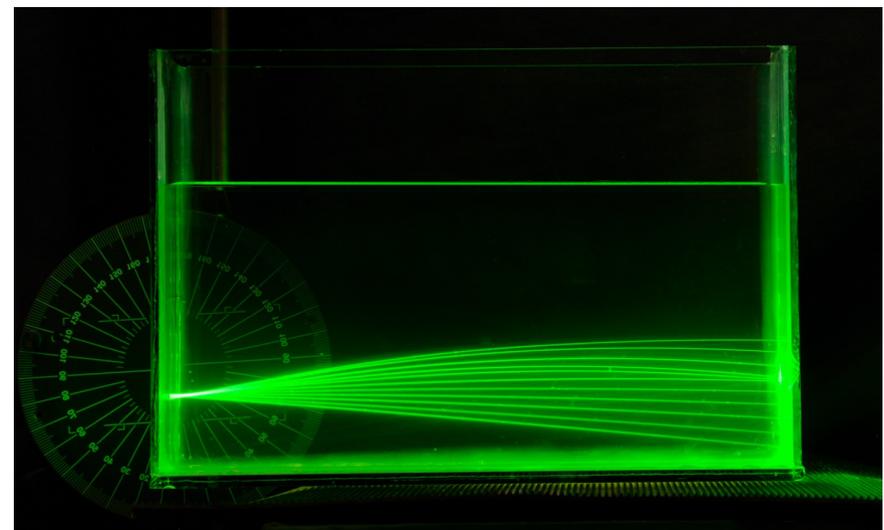
Entre deux points distants A et B, la lumière empruntera le chemin optique $d_{AB} \times n$ le plus court en temps.

Si l'indice est constant entre les deux points distants (milieu homogène), **le chemin le plus court est la ligne droite. C'est le rayon lumineux !**

Si l'indice n'est pas constant (milieu inhomogène) entre les deux points distants, le chemin le plus court n'est plus une ligne droite !



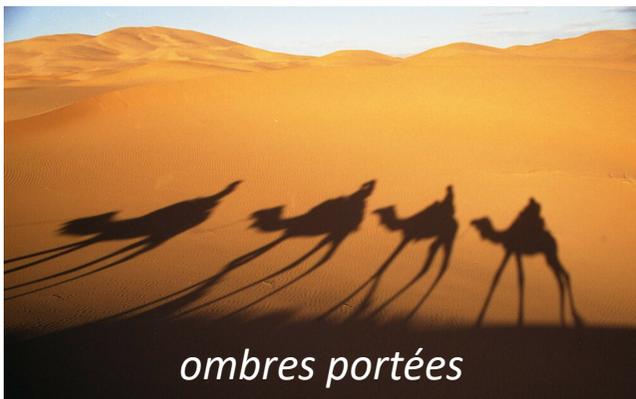
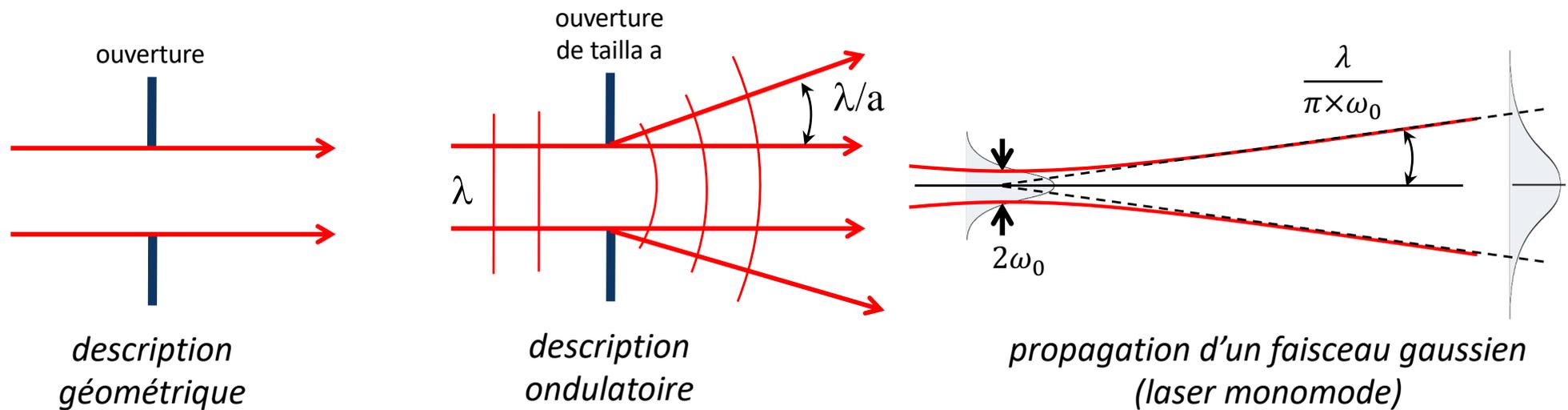
ombres portées



propagation dans un milieu inhomogène

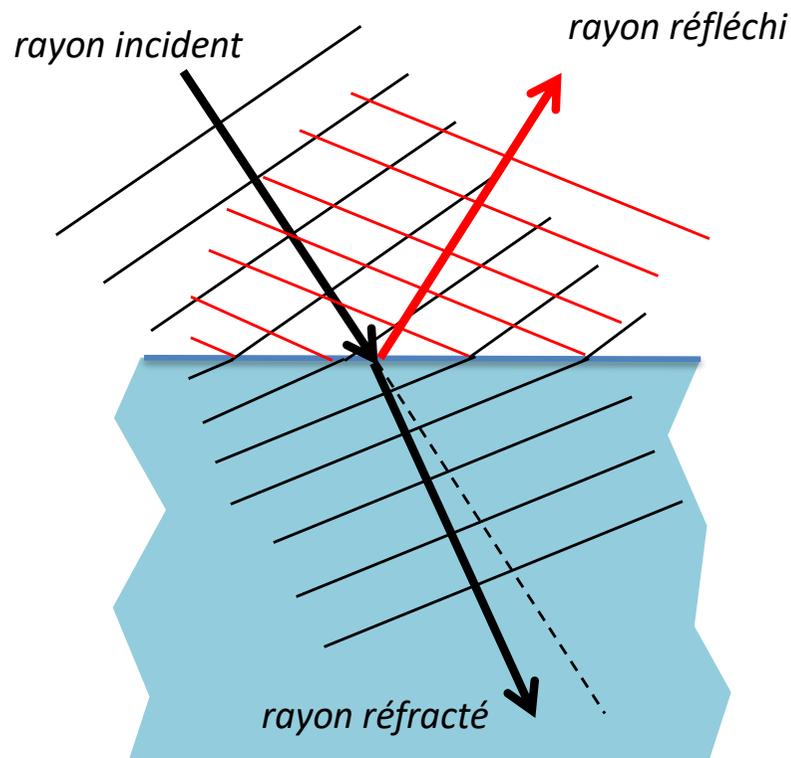
Propagation de la lumière

Le phénomène de **diffraction** est un écart à la propagation géométrique lorsque les obstacles ont des tailles qui sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.



Réflexion et réfraction à une interface

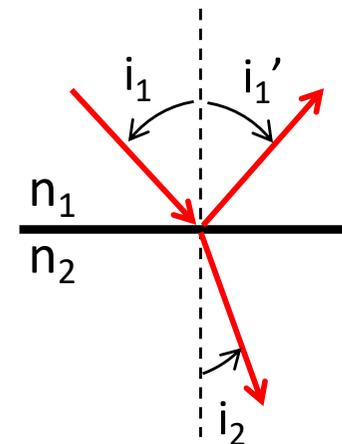
Au passage d'une interface parfaitement plane entre deux milieux, l'onde incidente est généralement scindée en une onde réfléchie et une onde transmise (réfractée). Les rayons **incident**, **réfléchi** et **réfracté** sont tous contenus dans le même plan, appelé plan d'incidence.



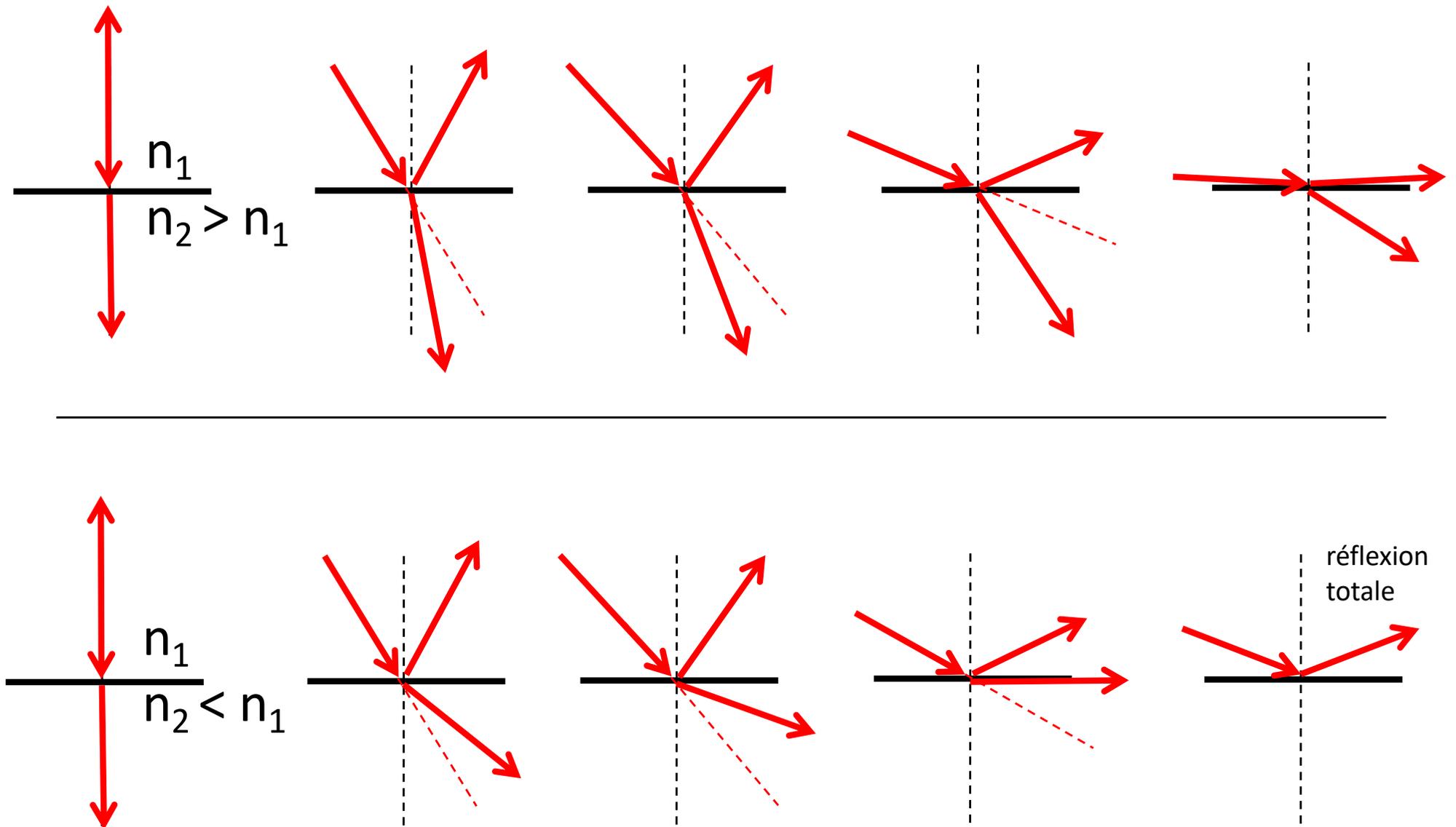
Les angles référés à la normale à l'interface obéissent aux relations suivantes,

$$i_1 = -i'_1$$

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



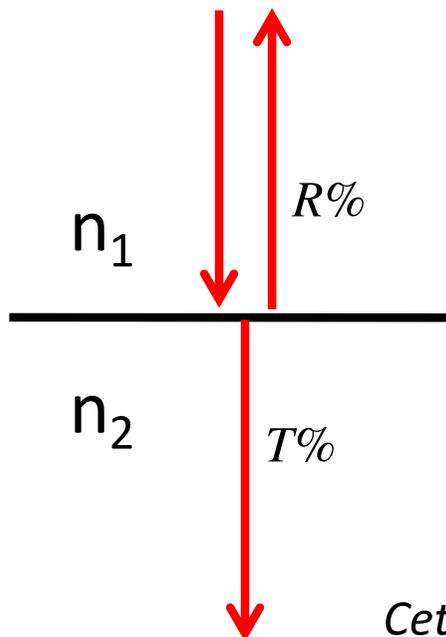
Réflexion et réfraction à une interface



Efficacité optique aux interfaces

Le modèle géométrique ne permet pas d'obtenir les quantités de lumière réfléchi et transmise à une interface. Il faut utiliser un modèle ondulatoire. Ce sont les **relations de Fresnel**. Les coefficients de transmission T et de réflexion R varient avec l'angle d'incidence, les indices (donc la longueur d'onde) et la polarisation. Si les milieux ne sont pas absorbants, on a $R + T = 1$.

En incidence quasi-normale (pas d'effet de la polarisation), on a $R \approx \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$



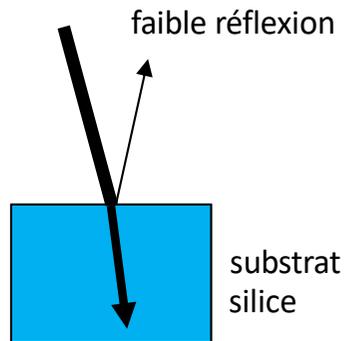
Dans le cas d'une interface air-verre dans le visible (indice proche de 1,5), on a $R = 4\%$. On parle de réflexion vitreuse (le reflet dans une vitre).



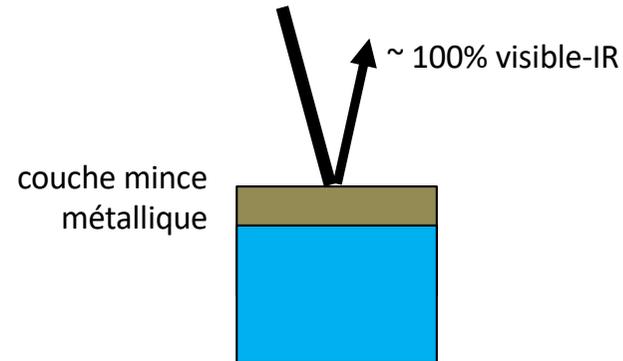
Cette faible efficacité nécessite de recourir à des revêtements réfléchissants pour les miroirs ou à des antireflets dans les cas des lentilles.

Efficacité optique aux interfaces

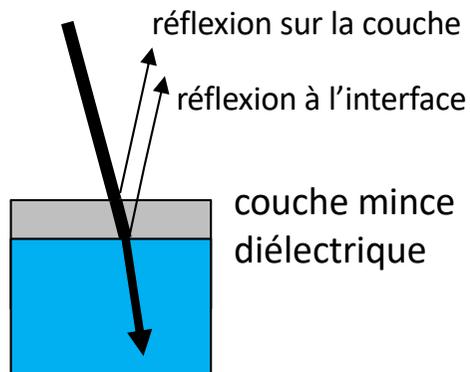
réflexion « vitreuse »



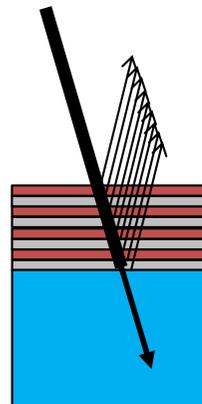
réflexion métallique



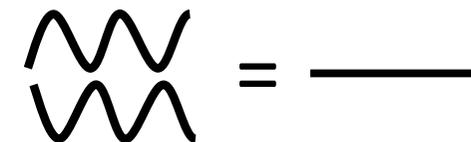
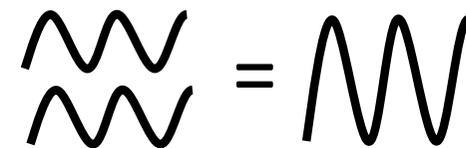
double réflexions



multiples réflexions



Le phénomène d'interférence est lié au principe de superposition des ondes. Elle peut être constructive (addition en phase) ou destructive (addition en opposition de phase)



Efficacité optique aux interfaces



revêtement à l'or des miroirs
du télescope James Webb ©nasa



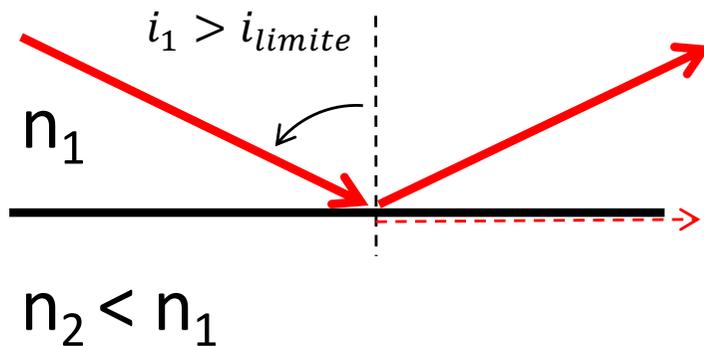
Diversité des revêtements optiques multicouches
© perkings precision

Efficacité optique aux interfaces : réflexion totale

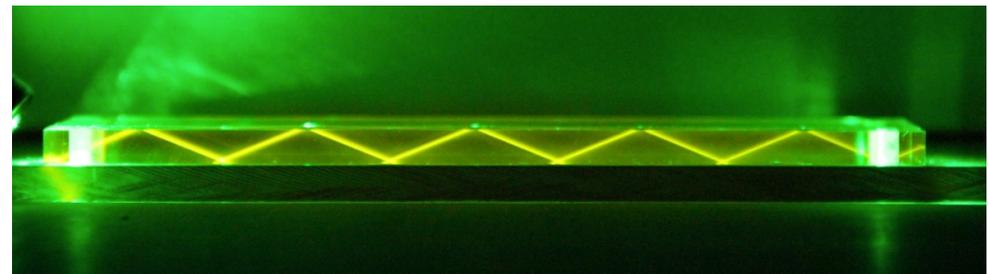
A une interface, lorsque l'indice du milieu d'où provient le rayon est le plus grand, il se produit une **réflexion totale** au-delà d'un certain angle d'incidence limite, qui vaut,

$$i_{\text{limite}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

cas verre-air @visible : $i_{\text{limite}} \sim 42^\circ$

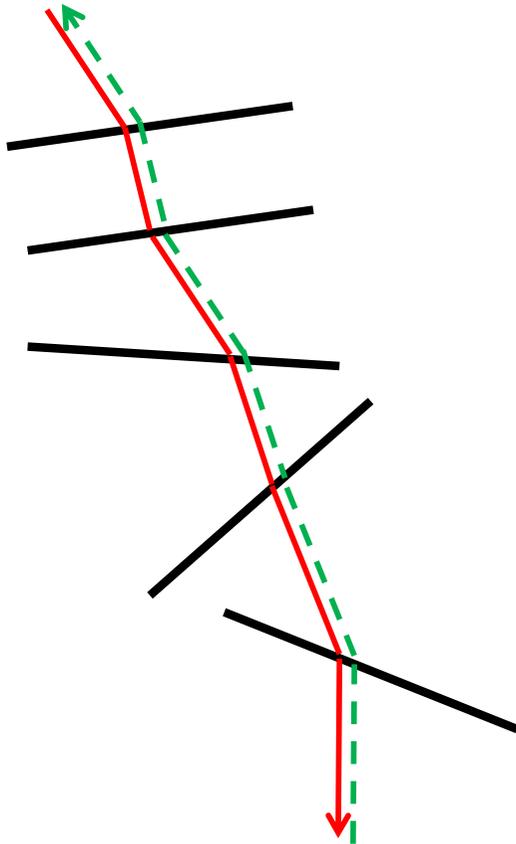


© Wikimedia Commons



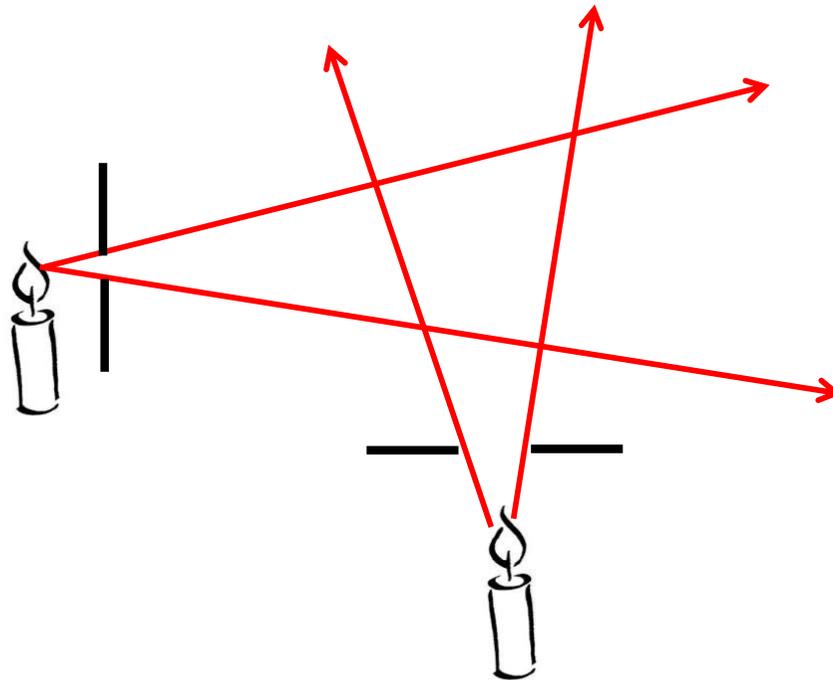
Retour inverse de la lumière

Un rayon lumineux parcouru par la lumière dans un sens peut à priori être parcouru dans l'autre sens.



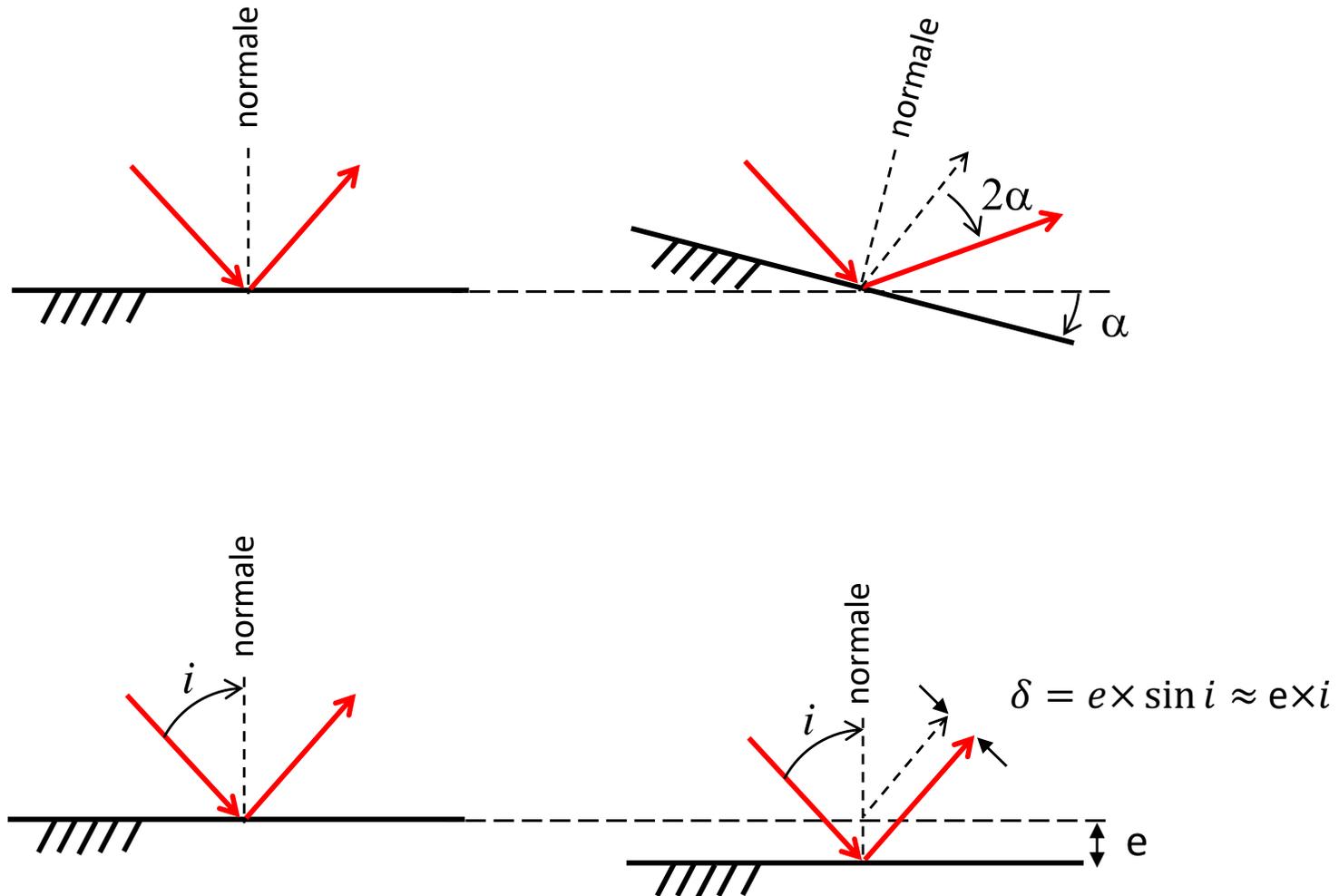
Indépendance des rayons lumineux

Les faisceaux de lumière ne peuvent pas agir les uns sur les autres



Fonction optique

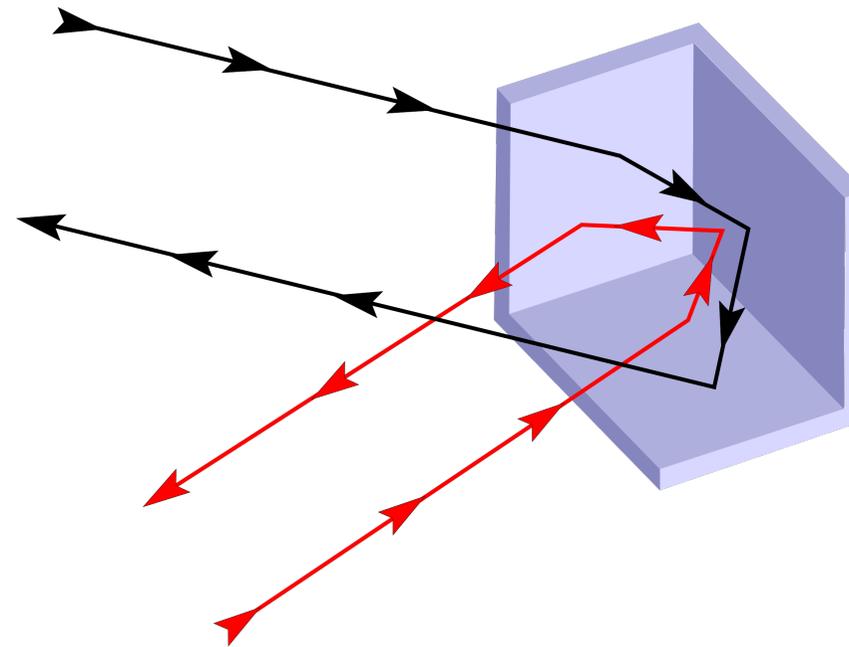
déflexion de faisceau par un miroir plan



Fonction optique

coin de cube

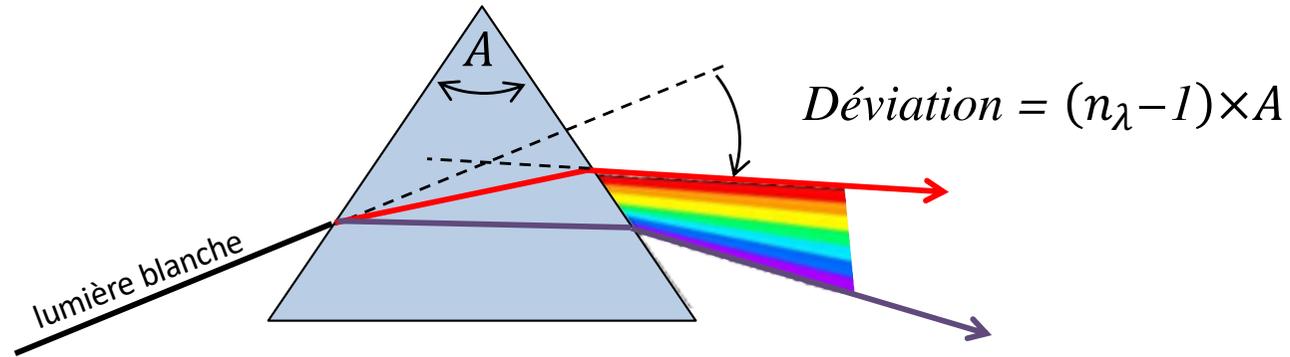
3 réflexions internes au cube permettent un retour du faisceau réfléchi dans la même direction que le faisceau incident.



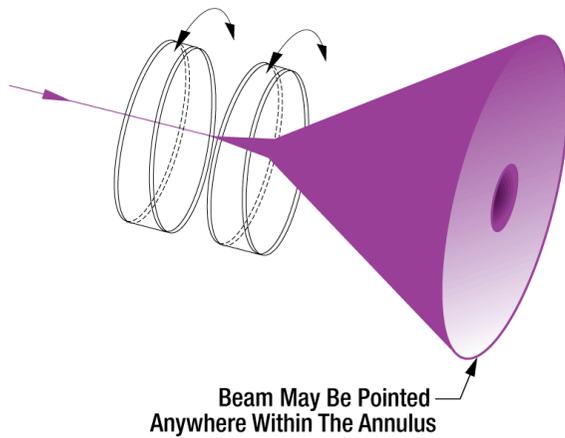
Rétro-réflecteur
de géomètre

Fonction optique

déviations dans un prisme



prismes de Risley



© Thorlabs

lunettes d'escalade

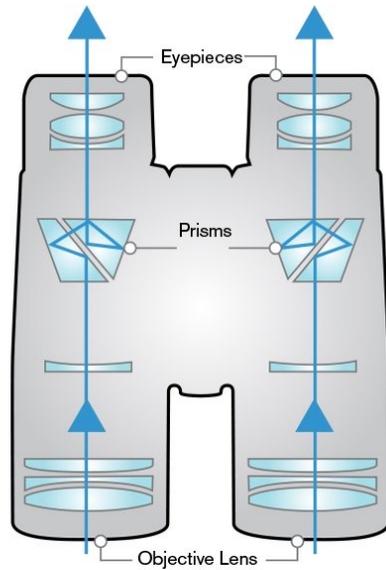


© Simond

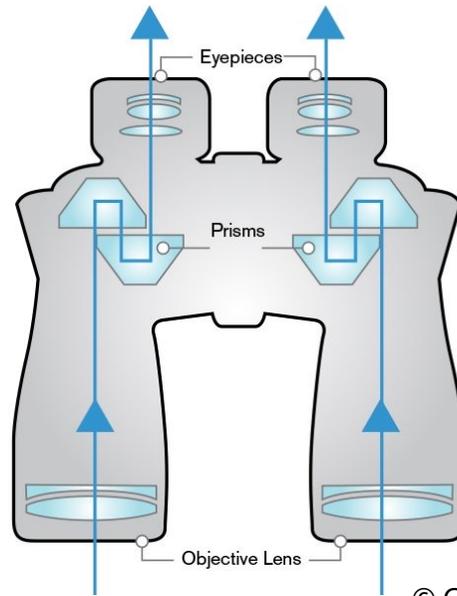
Fonction optique

déviations dans un prisme

Prisme de Pechan



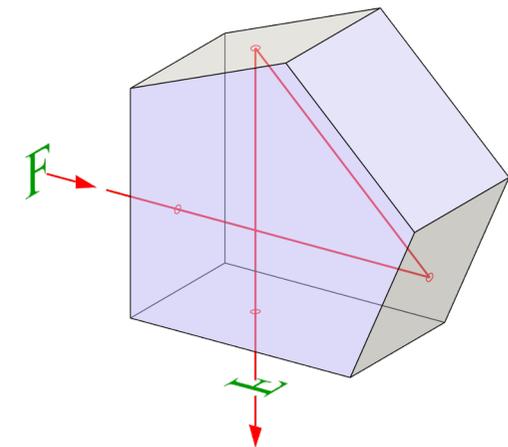
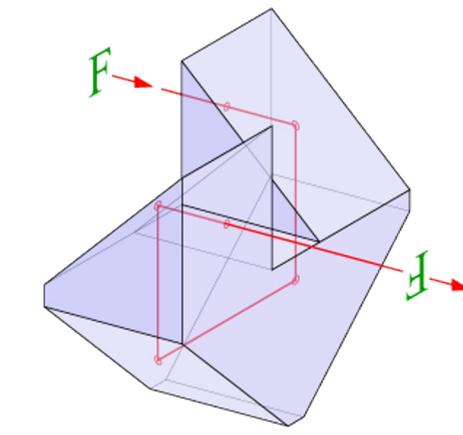
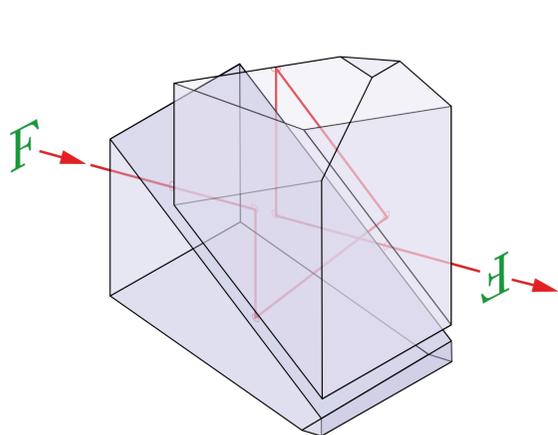
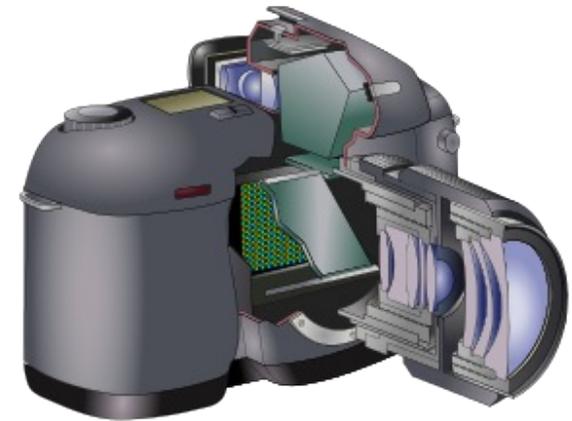
Prisme de Porro



© Celestron

Penta prisme

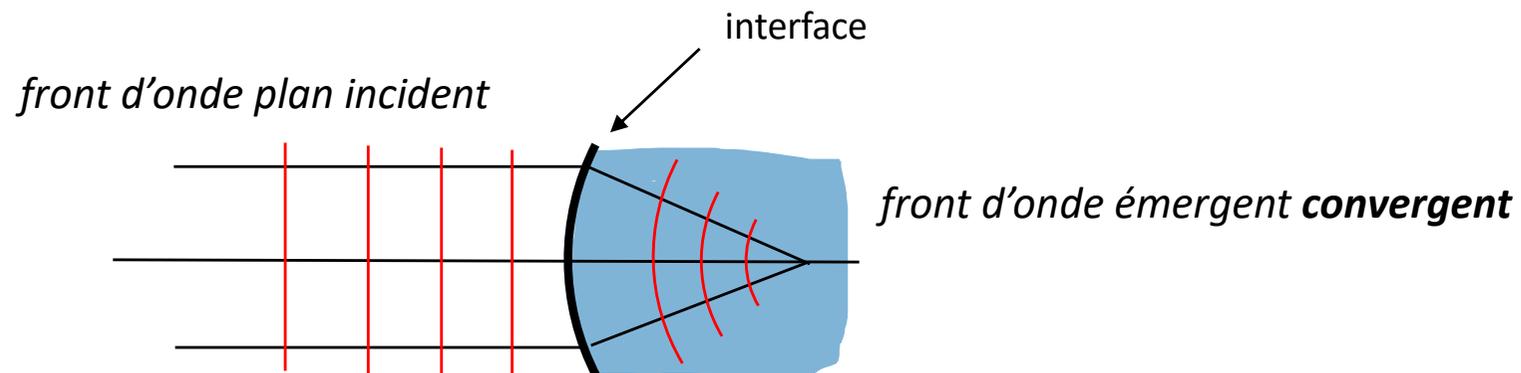
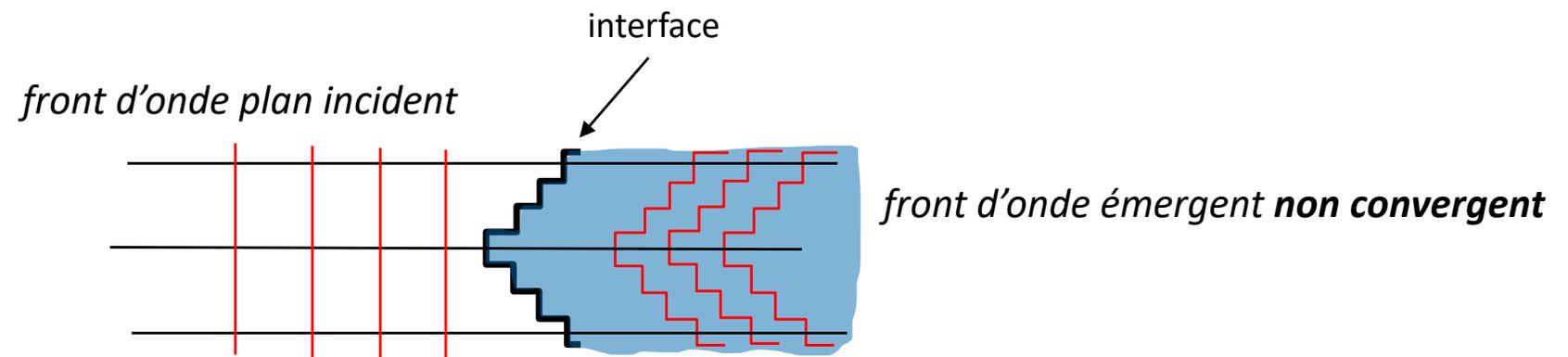
déviations à 90° du faisceau sans inverser l'image



Fonction optique

focalisation

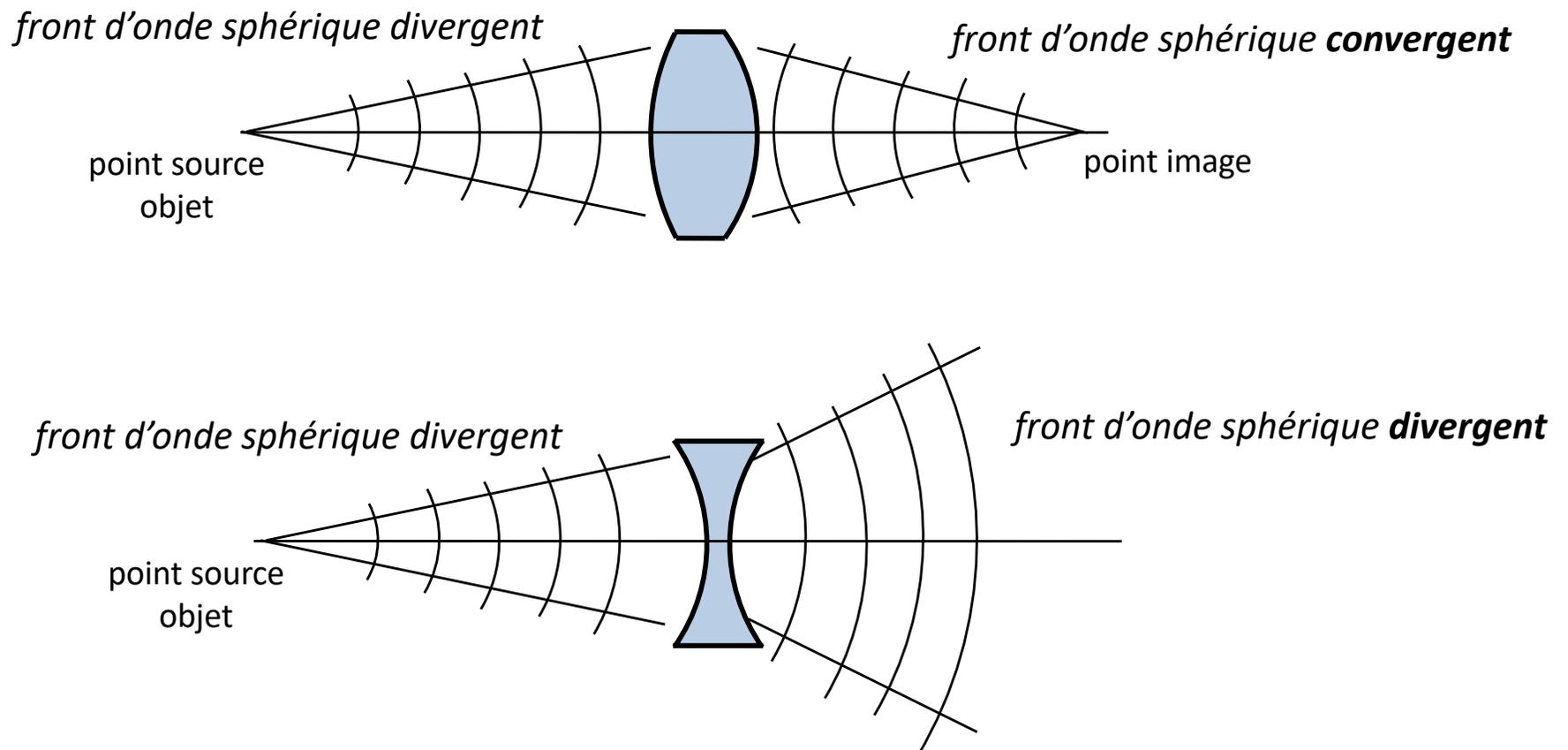
Une surface courbe, contrairement à une surface plane (même par morceau), peut courber un front d'onde plan (ou inverser la courbure d'un front d'onde sphérique). Effet équivalent en réflexion. Cet effet est à la base de la focalisation des faisceaux et de la formation des images par des lentilles et des miroirs.



Fonction optique

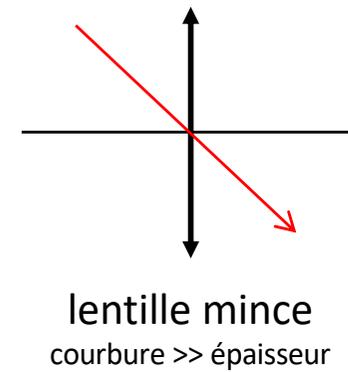
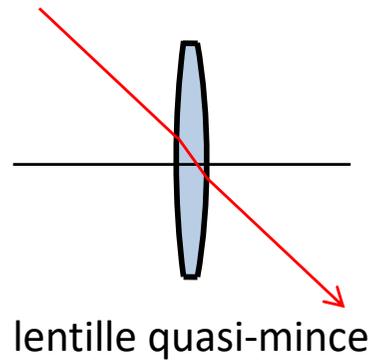
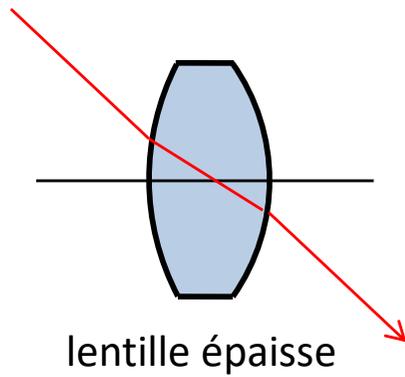
focalisation par une lentille

L'association de deux dioptries non plans permet de créer une lentille épaisse. La propriété de convergence des rayons est définie par la **distance focale** (directement liée aux courbures des dioptries et à l'indice du matériau utilisé).



Fonction optique

régime des lentilles minces



Fonction optique

esquisse d'un système optique

Les performances « géométriques » d'un système optique « épais » sont usuellement étudiés en « régime mince » avant toute conception logicielle.

Exemple de la lunette terrestre

