



POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL

PHS 4700  
Physique pour les applications multimédia

## Chapitre 6 — Optique

Djamel Seddaoui

Département de Génie Physique

## Table des matières

---

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Description de la lumière

### Description de la lumière

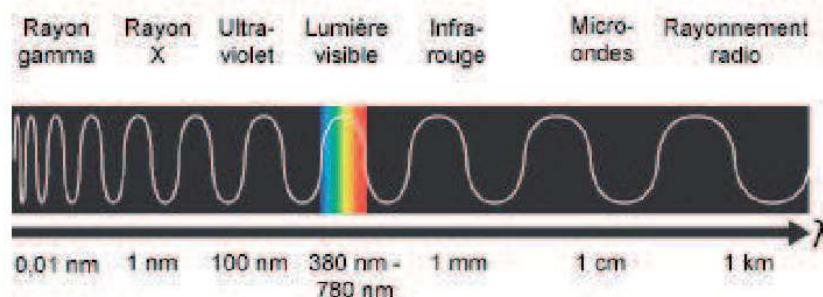
Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

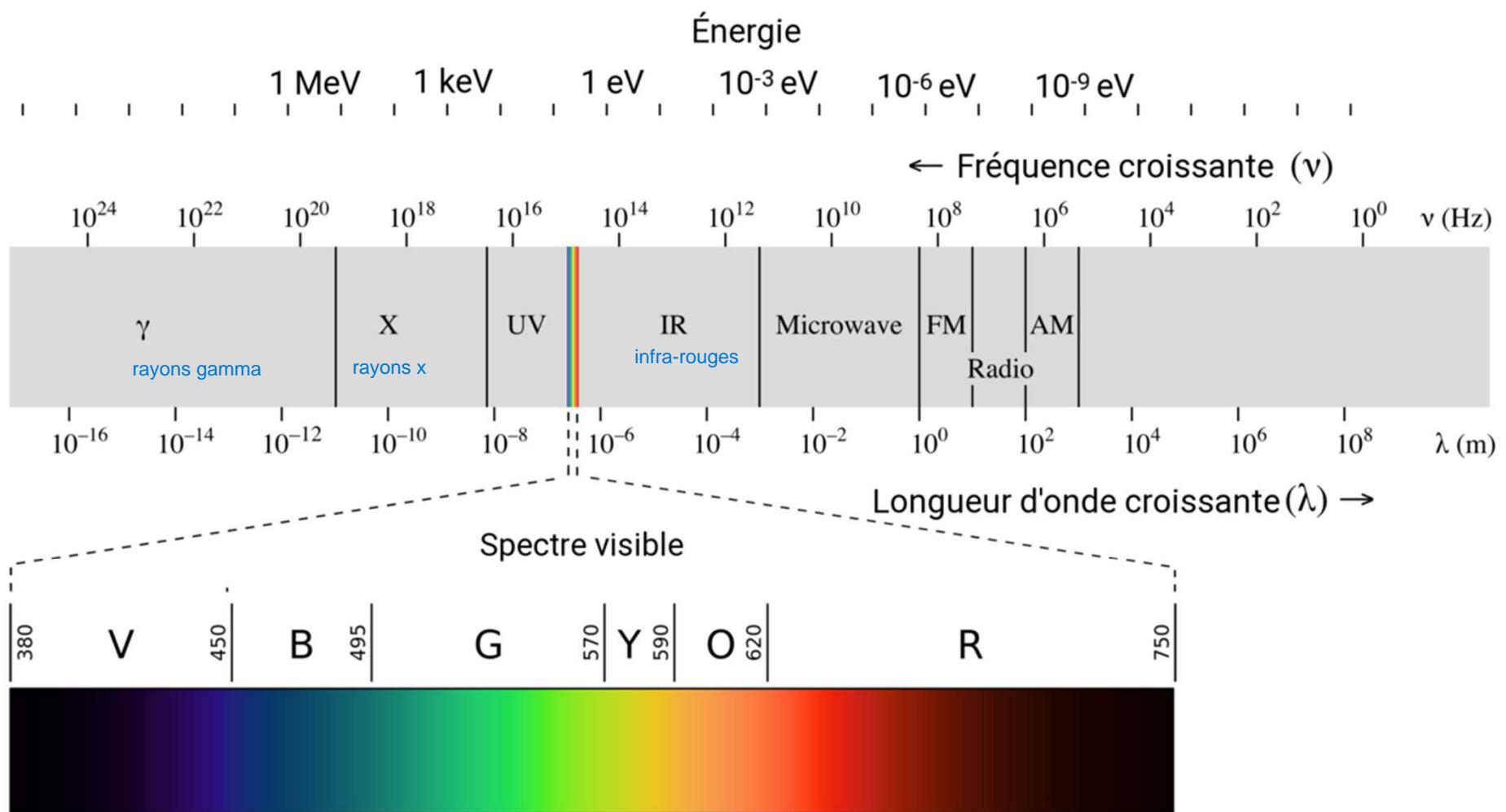
La lumière désigne la gamme d'ondes électromagnétiques auxquelles l'oeil est sensible ce qui correspond à des longueurs d'onde variant entre 380 et 780 nm.

- les ondes électromagnétiques visibles de fréquences élevées (les longueurs d'onde minimales) correspondent à la couleur violette ;
- les fréquences les plus faibles (les longueurs d'onde maximales) correspondent à la lumière rouge ;

Le concept de couleur est en fait directement relié au système visuel de l'être humain.

différence entre couleur verte et bleue:  
la longueur d'onde





# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Noter qu'en réalité :

- La lumière se comporte comme une onde (combinaison de champs électrique  $\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t)$  et magnétique  $\vec{\mathcal{B}}(\vec{r}, t)$ ) lorsqu'elle interagit avec des appareils macroscopiques. L'énergie de l'onde est proportionnelle à  $\mathcal{E}^2 + \mathcal{B}^2$ ).
- La lumière se comporte comme une particule (photon d'énergie  $h\nu$ ) lorsqu'elle interagit avec les particules à l'échelle atomique ou nucléaire.



constante de Plank, fréquence en Hertz

## Description de la lumière

### Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Comme toute onde électromagnétique :

- la lumière se déplace dans le vide à une vitesse constante  $c = 299792458 \text{ m/s}$  ;
- la fréquence d'une onde électromagnétique  $\nu$  et sa longueur d'onde  $\lambda$  sont reliées par

$$\nu\lambda = c$$

- \* ce qui se conserve est la fréquence, car la fréquence est relié à l'énergie et l'énergie se conserve
- \* vitesse varie
- \* longueur d'onde varie (si vitesse diminue, longueur onde diminue aussi)

## Description de la lumière

### Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Vitesse de la lumière et propriétés électromagnétiques du milieu :

- la vitesse de la lumière dans le vide est reliée à la permittivité et la perméabilité du vide \* vitesse dans le vide est constante!  
\* vitesse dans un milieu: dépend du milieu!

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

avec  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  et  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  ;

- la vitesse de la lumière  $c_m$  dans un milieu  $m$  est reliée à la permittivité et la perméabilité du milieu

$$c_m = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_r \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} c$$

*indice de réfraction de mon chjt*

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

$\epsilon_0$ : Permittivité du vide

$\mu_0$ : Permeabilité du vide

dans un milieu :  $\epsilon, \mu$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

L'relative

## Description de la lumière

### Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

- la fréquence d'un signal lumineux qui pénètre dans un milieu d'indice de réfraction  $n_m$  ne change pas, car son énergie ne change pas

$$E = h\nu$$

- la longueur d'onde de la lumière  $\lambda_m$  est cependant réduite par un facteur de  $1/n$

$$\lambda_m = \frac{c_m}{\nu} = \frac{c}{\nu n} = \frac{\lambda}{n}$$

## Description de la lumière

### Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

- l'indice de réfraction  $n_m$  d'un milieu correspond au rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et celle dans le milieu

$$n_m = \frac{c}{c_m} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$$

- l'indice de réfraction du vide correspond à  $n_{\text{vide}} = 1$  ;
- en général, on spécifie l'indice de réfraction moyen d'un milieu comme étant son indice de réfraction pour une longueur d'onde de 589.29 nm.

## Description de la lumière

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et  
absorption

Tableau d'indices de réfraction (valeur moyenne) à 589.29 nm.

Gaz	<i>n</i>	Liquide	<i>n</i>	Solide	<i>n</i>
Vide	1.0	Eau	1.333	Glace	1.31
Air (TPS)	1.0002926	Éthanol	1.361	Diamant	2.419
Air (0 C)	1.000293	Benzène	1.501	Quartz	1.458
CO <sub>2</sub> (0 C)	1.00045	CCL4	1.461	Verre	1.470

# Description de la lumière

## Description de la lumière

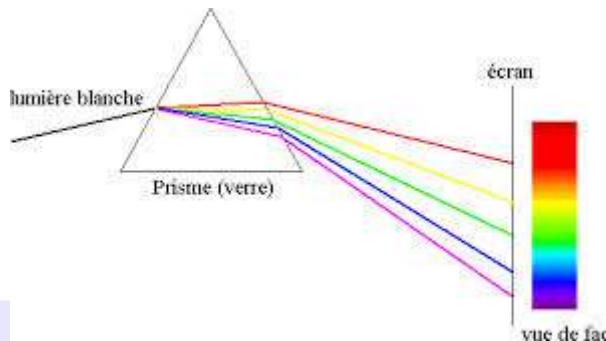
Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

L'indice de réfraction d'un milieu est généralement différent pour différentes fréquences de lumière, cette dépendance de  $n$  sur  $\lambda$  (ou  $v$ ) étant la source de la dispersion de la lumière blanche en différentes couleurs par un prisme. Pour la lumière visible,  $n(\lambda)$  a la forme approximative suivante (loi de Cauchy)

constante

$$n(\lambda) = a_0 + \frac{a_1}{\lambda^2}$$

$\lambda$ (nm)	$n(\lambda)$ eau	$n(\lambda)$ verre
440 (violet)	1.34029	1.46635
560 (vert)	1.33432	1.4595
780 (rouge)	1.32896	1.4536



## Description de la lumière

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et  
absorption

Christiaan Huygens (1629-1695) dans son «Traité de la Lumière» est le premier à décrire de façon cohérente les propriétés d'interférence et de diffraction de la lumière.

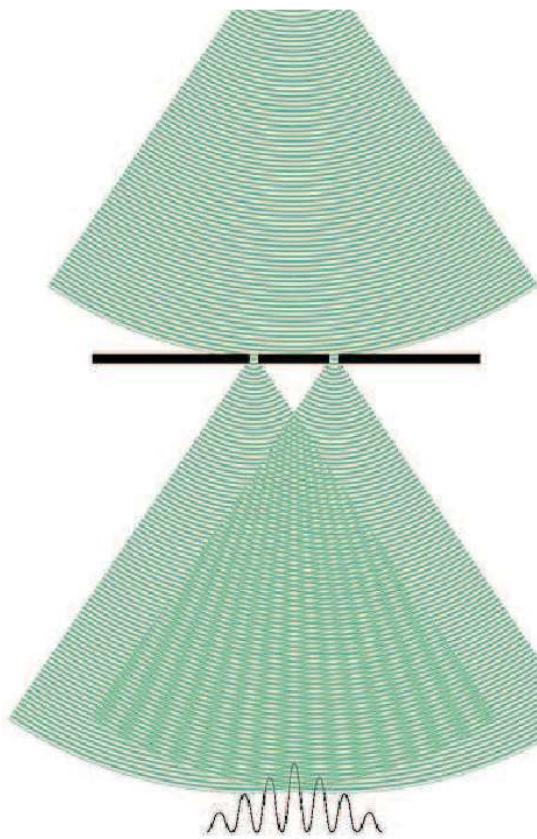
- Il représente la propagation d'une source lumineuse dans un milieu par un front d'onde sphérique.
- Il suppose que chaque point du front d'onde agit comme une source de lumière ponctuelle (un nouveau front d'onde sphérique) de même fréquence et phase que l'onde originale.

# Description de la lumière

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et  
absorption

Interférence.



\*passer une lumière par 2 fentes

\*chaque fente va diffuser la lumière

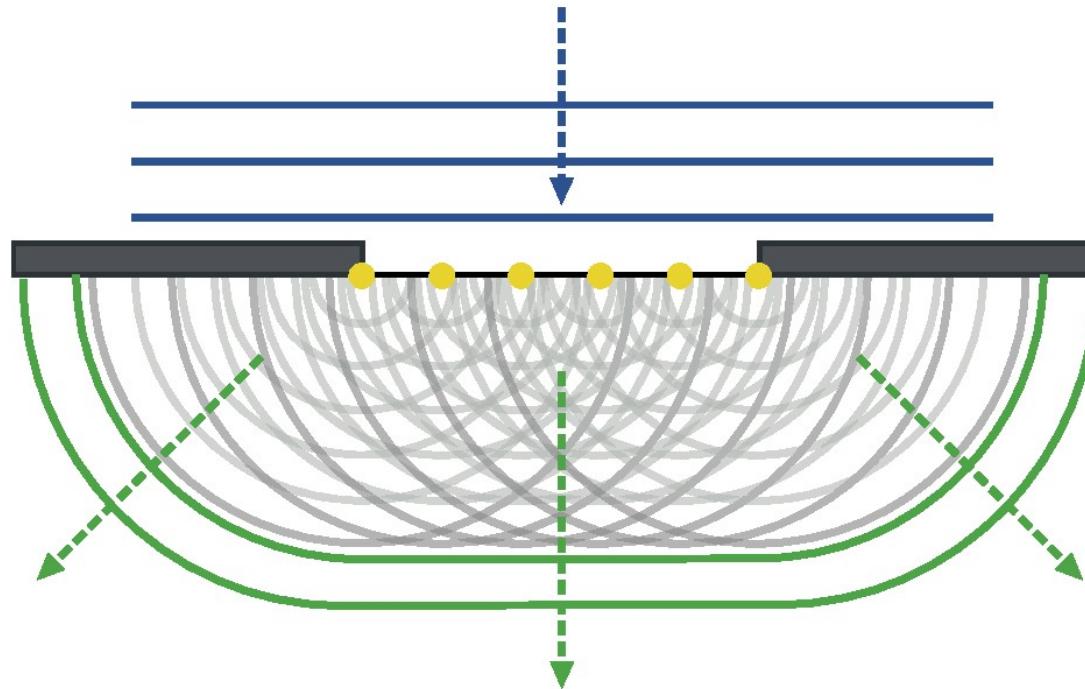
\*on va avoir une figure d'interférence, endroit que les deux ondes s'additionnent

# Description de la lumière

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et  
absorption

## Diffraction par le principe d'Huygens.



## Propagation de la lumière

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Dans la majorité des études avec des objets macroscopiques (optique classique ou géométrique), on utilise cependant une autre vision de la lumière ;

- la trajectoire que suit la lumière est représentée par une série de lignes droites (rayons) qui vont de l'observateur à l'objet observé ;
- c'est comme si on suivait les photons un à la fois de la source vers l'observateur ; **ou inversement: de l'objet observé vers observateur**
- cette méthode est très pratique lorsque l'on désire reconstituer l'image perçue par un observateur.

## Propagation de la lumière

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Quand je vois des objets, ex:une table, c'est les Rayons lumineux.

- Toute source de lumière émet des photons (ondes électromagnétiques).
- Les photons qui ne rencontrent pas d'obstacles se propagent en ligne droite.
- Un rayon lumineux débute à la position de la source (souvent ponctuelle) et se termine à l'observateur (aussi ponctuel).

Lorsque l'on est près de la source, les rayons lumineux divergents.

- La densité  $\rho(r)$  des rayons diminue à mesure que l'on s'éloigne de la source

$$\rho(r) \propto \frac{1}{4\pi r^2}$$

et l'intensité du signal lumineux diminue de façon équivalente (en 3D).

Lorsque le prof nous regarde par les fenêtres de la classe, le rayon lumineux se reflète, donc c'est pour ça il nous voit

17 / 105

Aussi, il peut voir l'extérieur, c'est la lumière qui s'est diffusé vers l'extérieur des fenêtres

# Propagation de la lumière

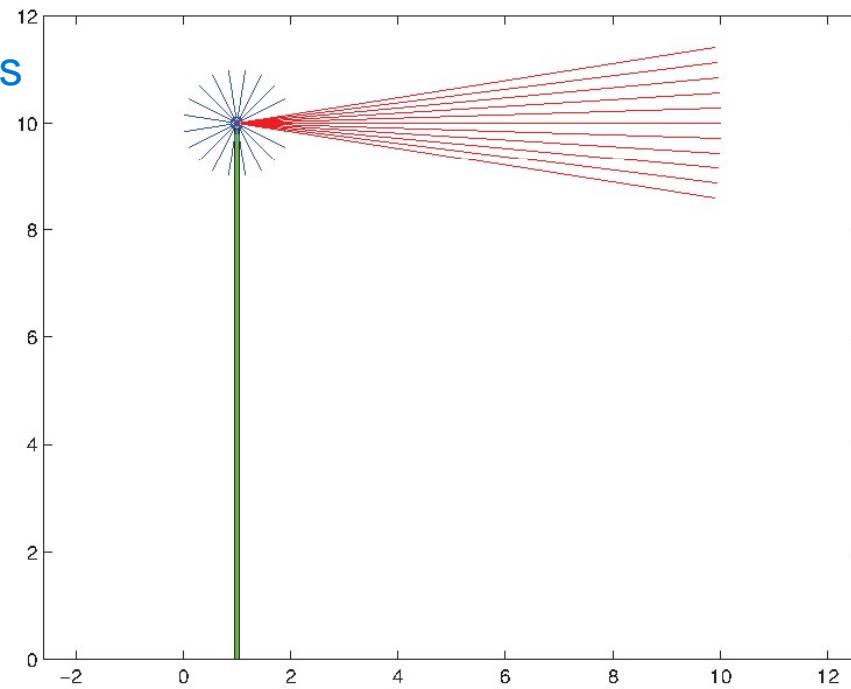
Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Proche de la source: rayons divergents

Loin de la source: rayons parallèles

Lorsque l'on est près de la source, les rayons divergent, alors qu'à une distance très éloignée, on peut supposer que les rayons lumineux deviennent parallèles. L'intensité du signal lumineux est alors presque indépendante de la position spatiale.



# Propagation de la lumière

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Avantages principaux d'utiliser des rayons pour simuler la lumière :

- on peut facilement visualiser graphiquement la trajectoire de la lumière lors de simulations numériques ;
- les rayons sont de lignes en 3D ce qui est facile à traiter numériquement.

Rappel des équations pour une ligne en 3D

$$\vec{r}(s) = \vec{r}(0) + s\hat{u}$$

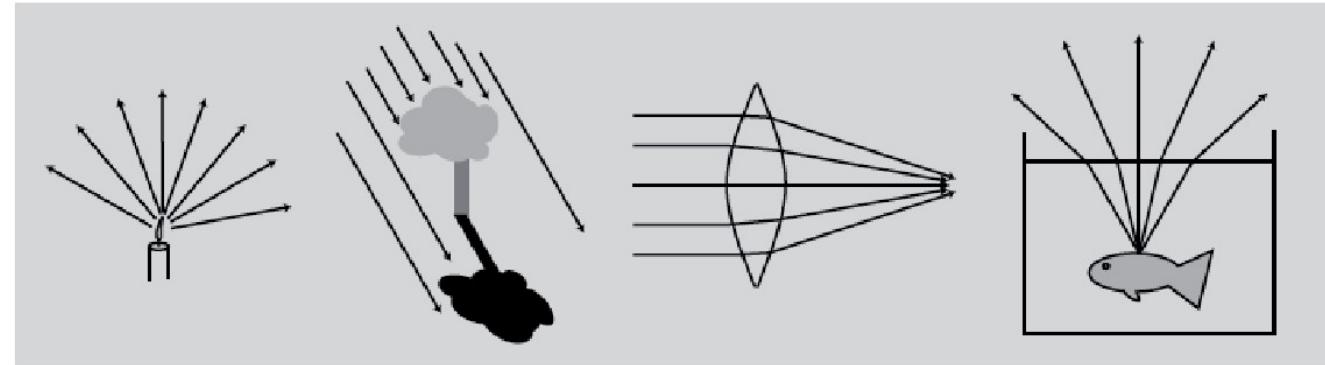
avec  $s$  un paramètre quelconque,  $\vec{r}(0)$  un des points sur la ligne et  $\hat{u}$  un vecteur unitaire donnant la direction de la ligne.



Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et  
absorption

## Comportement des rayons de lumière.



## Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

### Commentaires.

- Dans le cas où la lumière rencontre un obstacle solide (un miroir), il est normal qu'elle soit réfléchie de la même façon qu'une balle entrant en contact avec un mur (l'angle d'incidence égal l'angle de réflexion tous deux mesurés par rapport à un plan normal au rayon lumineux), car la lumière est une particule après tout.
- En fait, le problème est beaucoup plus complexe, car lors de la réflexion, les propriétés ondulatoires des ondes lumineuses affecteront la lumière réfléchie ou transmise.
- Tout objet qui peut être perçu par un observateur est considéré comme émettant de la lumière, même si cette lumière n'est pas générée par l'objet, mais est le résultat d'une réflexion de lumière venant d'une autre source (invariance pour l'inversion du temps).

## Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

En optique géométrique, on se concentre généralement sur des modèles idéalisés pour la réflexion et la réfraction :

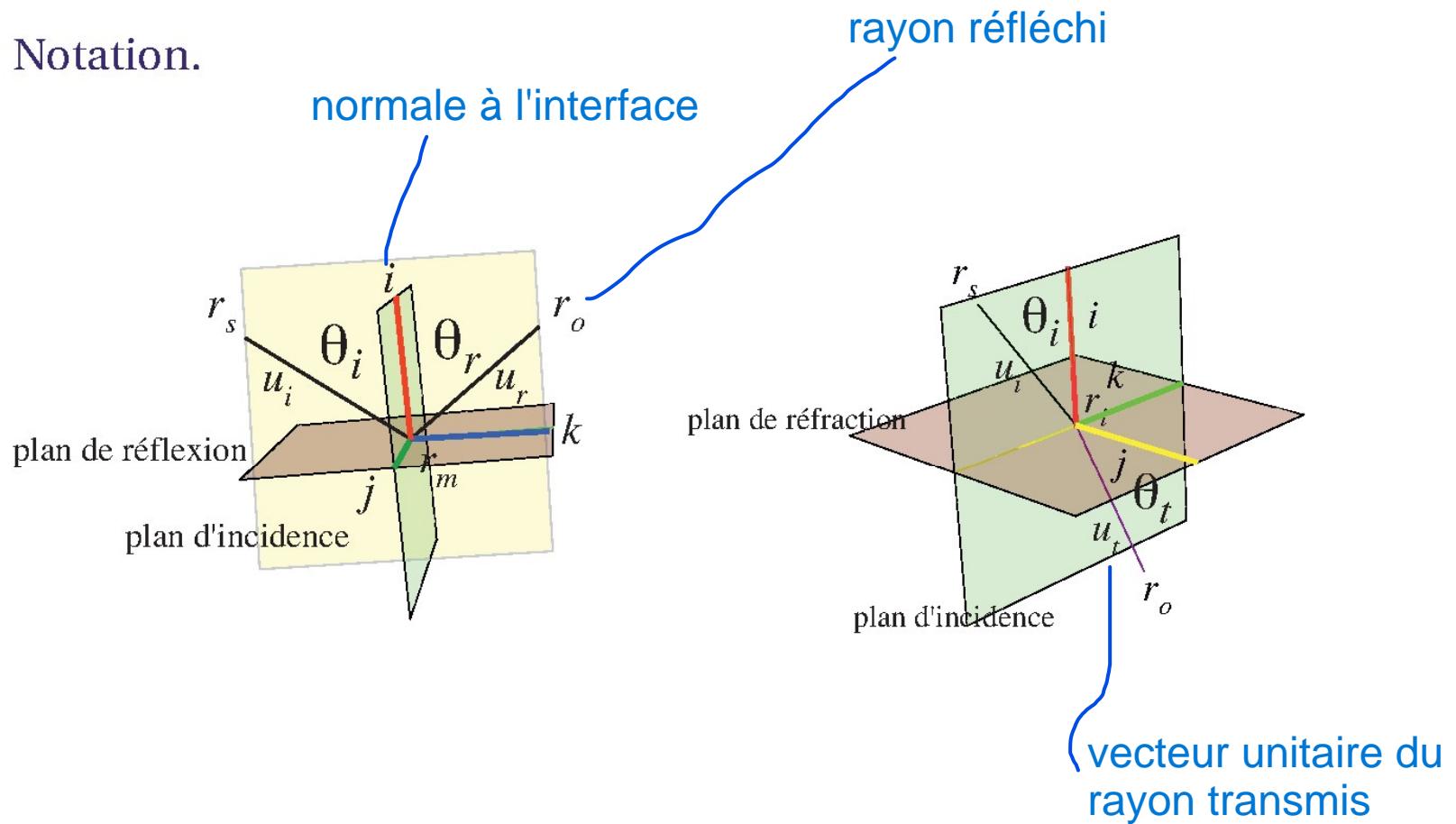
- la réflexion parfaite (ou miroir) du rayon lumineux par une surface ;
- la transmission parfaite du rayon lumineux entre deux milieux.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Notation.



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Analyse de la réflexion

On associe au rayon lumineux qui se déplace en 3D un vecteur unitaire  $\vec{u}_i$  qui décrit sa direction initiale de propagation

$$\vec{u}_i = \frac{\vec{r}_m - \vec{r}_s}{|\vec{r}_m - \vec{r}_s|}$$

avec  $\vec{r}_s$  la position de départ du rayon (la source) et  $\vec{r}_m$  le point où il touche la surface réfléchissante (miroir) ou la surface à travers laquelle est transmise la lumière (réfraction).

## Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

De la normale unitaire  $\vec{i}$  (sortante) à la surface au point  $\vec{r}_m$  il est alors possible de définir

$$\begin{aligned}\vec{j} &= \frac{\vec{u}_i \times \vec{i}}{|\vec{u}_i \times \vec{i}|} \\ \vec{k} &= \vec{i} \times \vec{j}\end{aligned}$$

Le plan défini par  $\vec{i}$  et  $\vec{k}$  est le plan d'incidence et le plan de réflexion est défini par les vecteurs  $\vec{j}$  et  $\vec{k}$ .

## Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Le rayon de lumière sera réfléchi de façon symétrique par rapport au plan d'incidence (tout ce qui change c'est sa composante  $\vec{i}$  qui s'inverse). Ainsi, la direction  $\vec{u}_r$  du rayon lumineux après réflexion sera donnée par

$$\begin{aligned}\vec{u}_r &= \vec{u}_i - 2\vec{i}(\vec{u}_i \cdot \vec{i}) \\ &= \vec{i}\sqrt{1 - s_i^2} + \vec{k}s_i \\ s_i &= \vec{k} \cdot \vec{u}_i = \sin\theta_i\end{aligned}$$

On observe aussi que

$$\sin\theta_r = \sin\theta_i$$

qui est la première loi de Snell-Descartes.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Pour la réfraction :

- Le sinus de l'angle d'incidence  $s_i$  entre  $\vec{u}_i$  et le plan d'incidence est donné par

$$s_i = \sin(\theta_i) = \vec{u}_i \cdot \vec{k}$$

- Selon la seconde loi de Snell-Descartes, le sinus de l'angle de réfraction  $s_t$  est donné par

$$s_t = \sin \theta_t = \left( \frac{n_i}{n_t} s_i \right) = \left( \frac{n_i}{n_t} \vec{u}_i \cdot \vec{k} \right)$$



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- La direction de la lumière après réfraction est

$$\vec{u}_t = -\vec{i}\sqrt{1 - s_t^2} + \vec{k}s_t$$

- Notez que  $s_t$  est aussi donné par

$$s_t = \vec{u}_t \cdot \vec{k}$$

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- Si  $n_i < n_t$  toutes les valeurs de  $\theta_i$  sont permises et  $\theta_t$  varie entre zéro et  $\arcsin(n_i/n_t)$
- Si  $n_i > n_t$  les seules valeurs de  $\theta_i$  permises sont  $\leq \arcsin(n_t/n_i)$  elles généreront un ensemble complet de valeurs pour  $\theta_t$  ( $0 \leq \theta_t \leq \pi/2$ ). Si  $\theta_i > \arcsin(n_t/n_i)$  alors aucun rayon ne sera transmis. Le rayon sera entièrement réfléchi.

# Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Exemple de réfraction : le pinceau dans le bocal.



# Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Exemple de réfraction : le pinceau dans le bocal.



## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

La reconstruction d'images en utilisant les ordinateurs se base sur les principes qui suivent :

- on peut simuler la lumière par des rayons (ce que nous avons déjà vu) ;
- toute image peut être considérée comme représentant une source de lumière (ponctuelle ou diffuse) ;
- les rayons lumineux sont réversibles (nous avons déjà vu que ceci est vrai pour les lois de Snell-Descartes).

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Pour la réflexion deux options existent :

- méthode des images virtuelles ;
- méthode des rayons. [tient compte de la réflexion et de la réfraction](#)

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Méthode des rayons et réflexion

- Utilise la réversibilité des rayons de lumière.
- Le point de départ est donc l'observateur.
- On trace un ensemble de lignes qui partent de l'observateur.
- On suit ces lignes en les réfléchissant lorsque requis (sur le miroir).
- Elles se terminent lorsqu'elles atteignent l'objet. *si on atteint aucun objet, on arrête*
- On sauve le point de départ  $\vec{r}_0$  et les points successifs ( $\vec{r}_i$  avec  $i = 1, N$ ) où le rayon de lumière a touché le miroir ou l'objet.

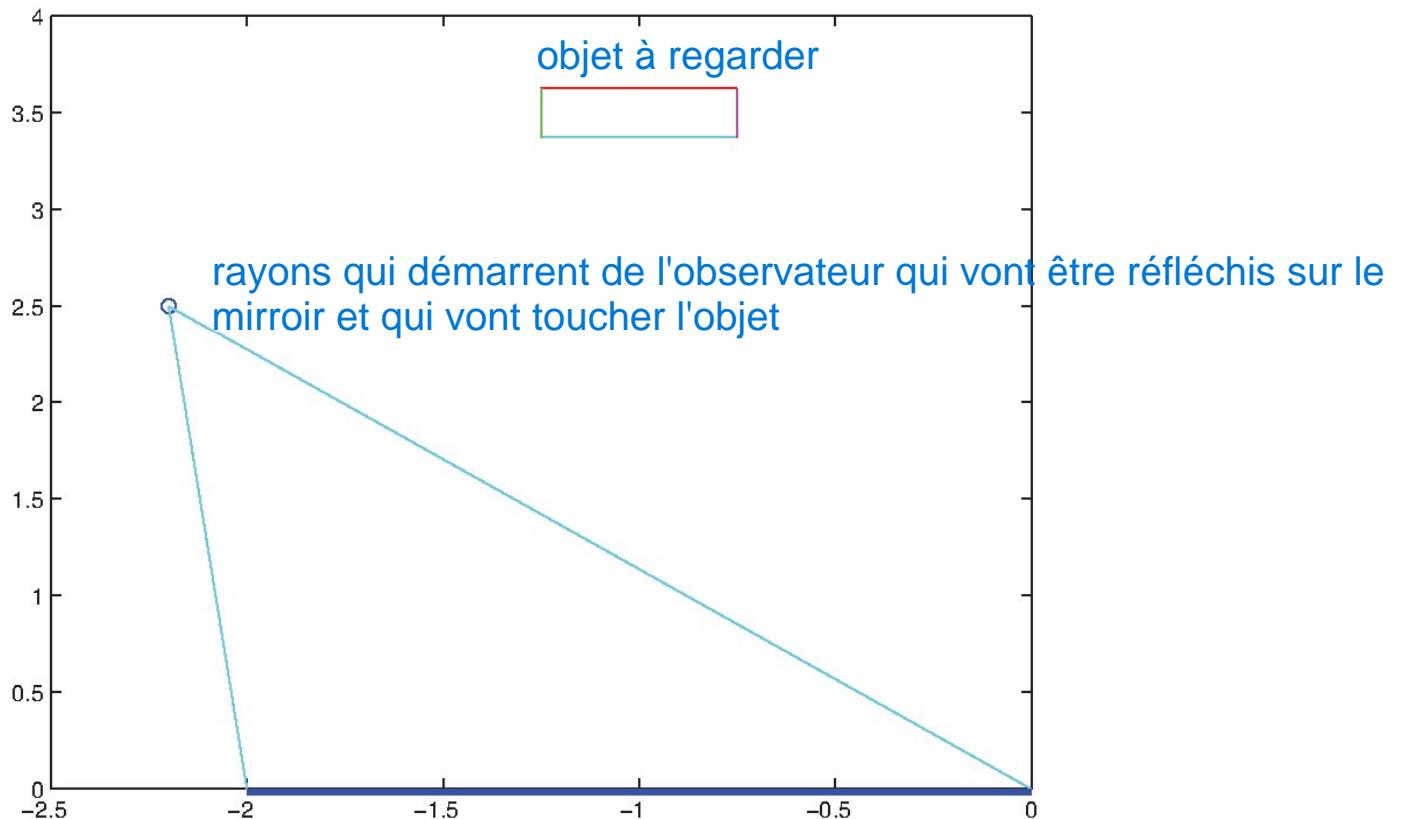
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Étape 1 : Choisir le secteur angulaire de départ.



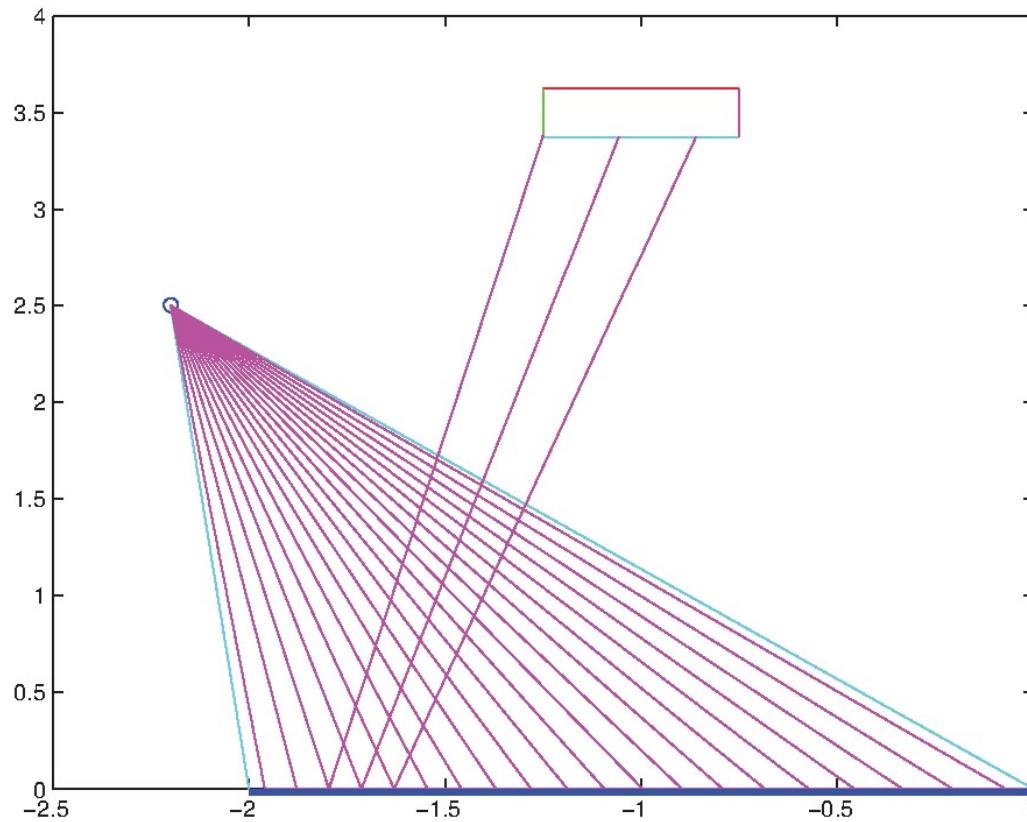
## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Étape 2 : Choisir  $N$  directions pour nos lignes (dans le secteur de départ) et les tracer.



## Reconstitution d'images

Description de la lumière

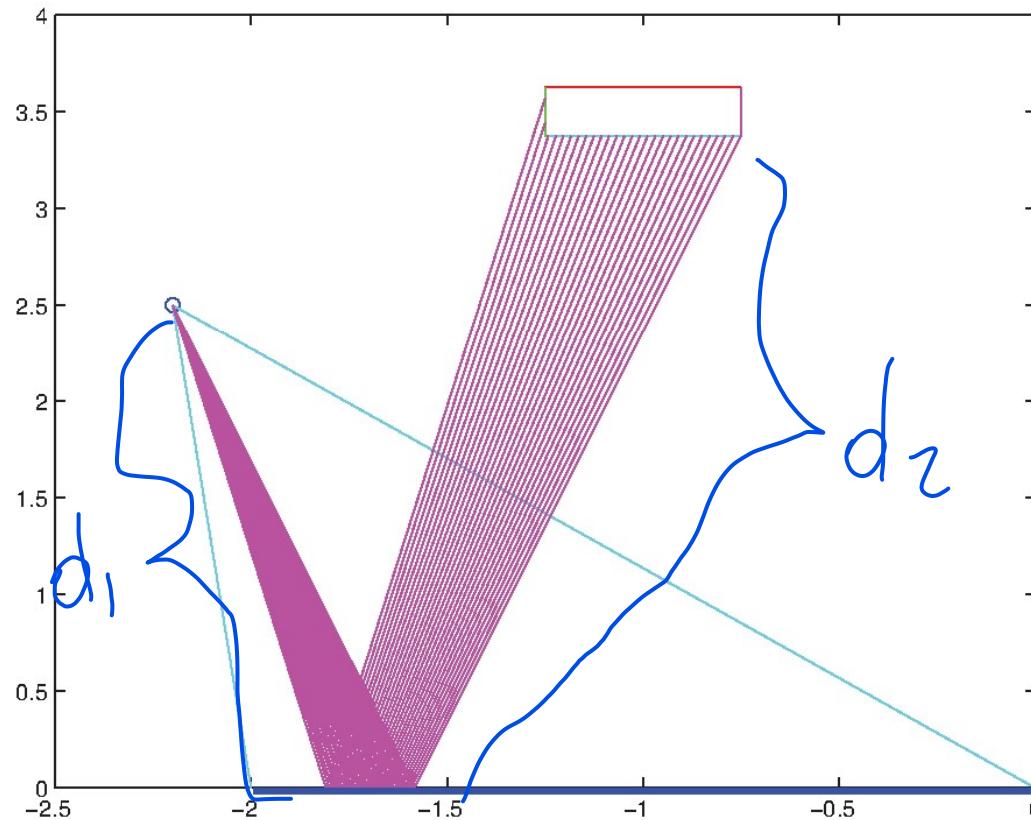
Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

j'augmente la densité pour ceux qui atteignent mon objet car c'est l'objet qui m'intéresse

Si on ask l'observateur où est l'objet?  
 - Il va répondre derrière le miroir

Étape 3 : Identifier les rayons qui atteignent l'objet.



$$d = d_1 - d_2$$



Il pense que l'objet est derrière le miroir car il voit les rayons

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

L'étape suivante consiste à déterminer la position de l'objet tel que vu par l'observateur :

- déterminer le vecteur donnant la direction initiale du rayon de lumière à partir de l'oeil

$$\vec{u} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_0}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_0|}$$

vecteur unitaire

le vecteur  $-\vec{u}$  donne la direction d'où provient la lumière lorsqu'elle touche l'oeil et donc  $\vec{u}$  est la direction où apparaîtra l'image pour l'observateur ;

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- déterminer la distance  $d$  totale parcourue par la lumière depuis la source

$$d = \sum_i^N |\vec{r}_i - \vec{r}_{i-1}|$$

- le point de l'objet touché apparaît pour l'observateur à la position

$$\vec{r}_p = \vec{r}_0 + d \vec{u}$$

- répéter pour tous les points jusqu'à formation de l'image complète.

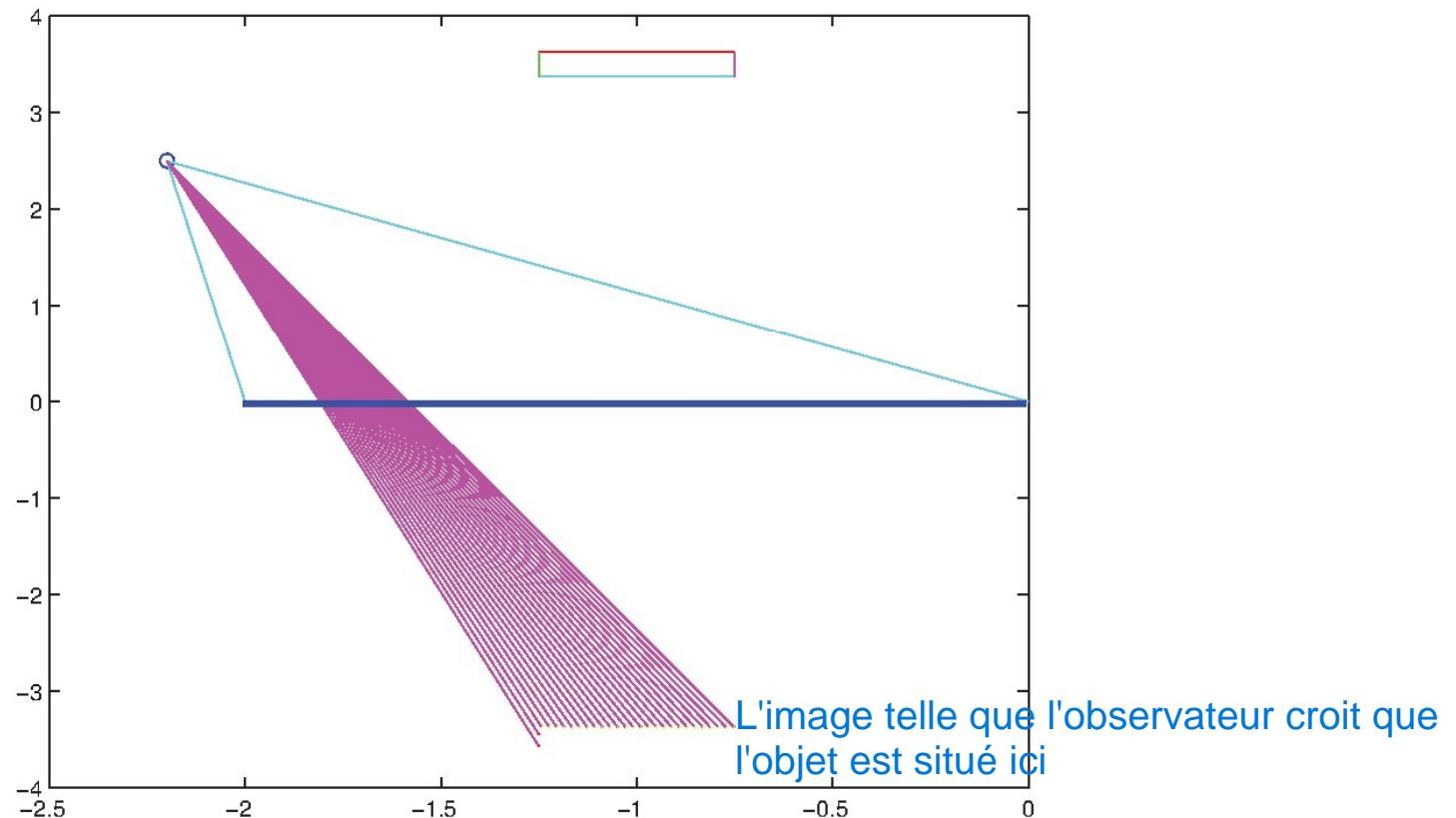
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Étape 4 : Tracer la position de l'image virtuelle.



## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Avantage de la méthode des rayons :

- elle fonctionne, quel que soit le nombre de miroirs ;
- elle fonctionne, quelle que soit la forme de ces miroirs ;
- elle peut être utilisée même si des obstacles ou des milieux d'indices de réfraction différents sont traversés par la lumière.

Inconvénients :

- elle requiert beaucoup de calculs ;
- elle ne génère pas une image complète, mais une série de points qui sont associés à l'image.

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

### Méthode des rayons et réfraction    rayons transmis

- Même traitement général que pour la réflexion.
- Le point de départ est donc l'observateur.
- On trace un ensemble de rayons lumineux qui partent de l'observateur.
- On suit ces rayons lumineux jusqu'à ce qu'ils atteignent le solide.
- On sauve le point de départ  $\vec{r}_0$  et les points successifs ( $\vec{r}_i$  avec  $i = 1, N$ ) où le rayon de lumière a touché une interface ou l'objet.

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- Lorsque la lumière touche une interface entre deux milieux, il faut premièrement déterminer si elle pénètre dans le second milieu ou si elle est réfléchie.
- Pour un rayon qui vient du milieu 1 et pourrait se retrouver dans le milieu 2, on calcule

$$s_2 = \left( \frac{n_1}{n_2} s_1 \right) = \left( \frac{n_1}{n_2} \vec{u}_1 \cdot \vec{k} \right)$$

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Si  $|s_2| > 1$  :

- ce rayon de lumière ne pourra pénétrer dans le milieu 2 et nous sommes en face d'une réflexion totale interne ;
- on procède alors à la réflexion du rayon comme pour un miroir, le rayon continuant à se déplacer dans le milieu 1.

Si  $|s_2| < 1$  :

- la lumière croise l'interface entre les milieux 1 et 2 ;
- on procède alors à la réfraction du rayon de 1 à 2 ;
- par la suite, le rayon continue à se déplacer dans le milieu 2.

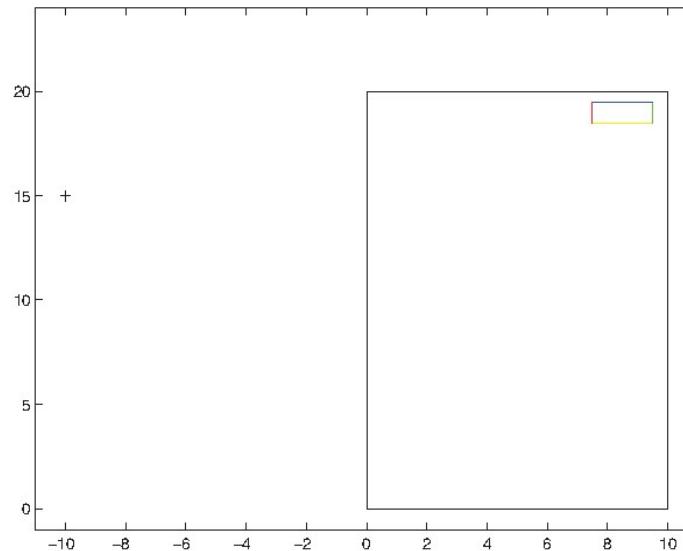
## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Exemple 2D : Cube de verre d'indice de réfraction  $n_v = 1.5$  contenant une lame de métal colorée le tout placé dans l'air  $n_a = 1.0$ .



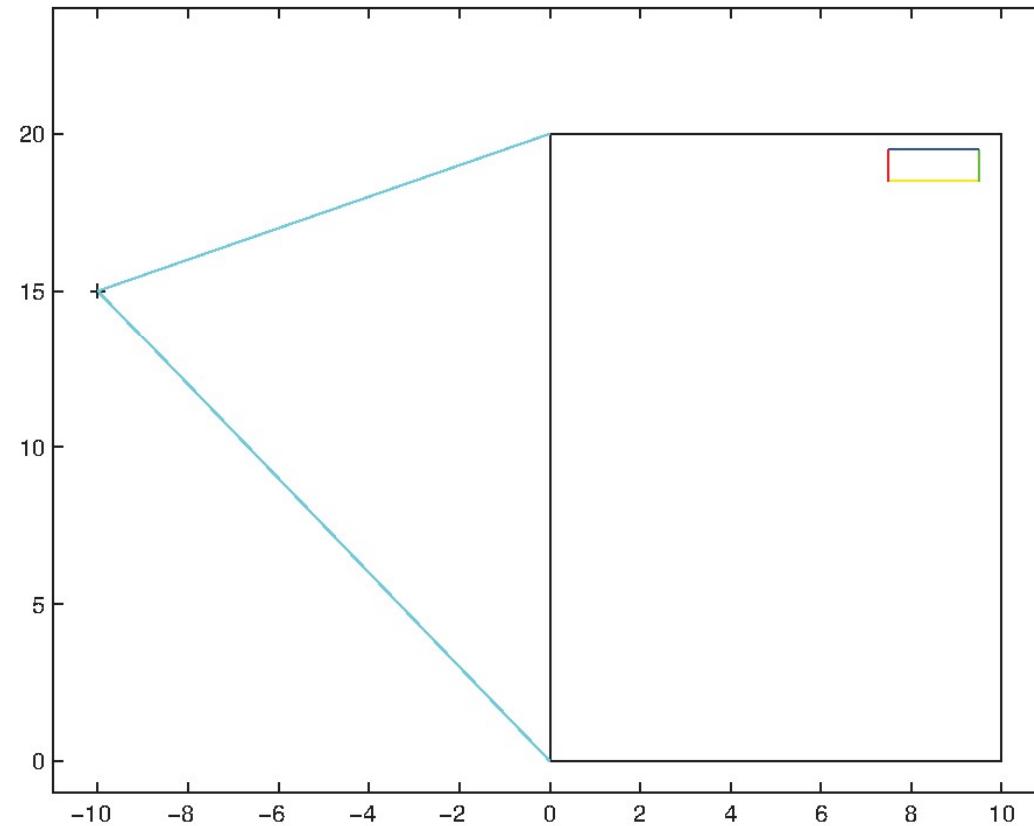
L'observateur est ici identifié par un +.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Étape 1 : Choisir le secteur angulaire de départ.



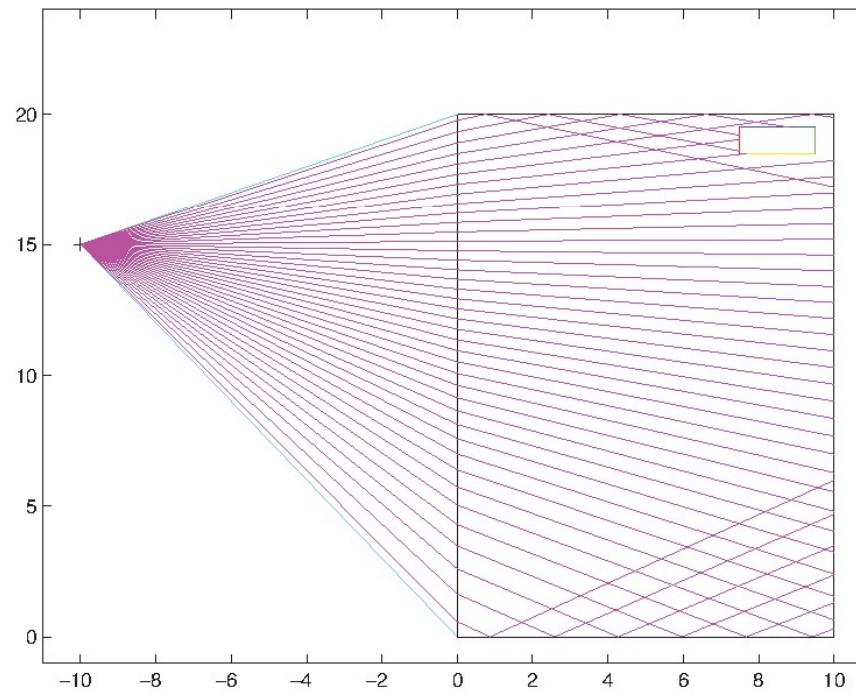
## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Étape 2 : Choisir  $N$  directions pour nos lignes (dans le secteur de départ) et tracer les trajectoires qu'elles peuvent suivre jusqu'à leur sortie du bloc de verre où qu'elles touchent la lame de métal.



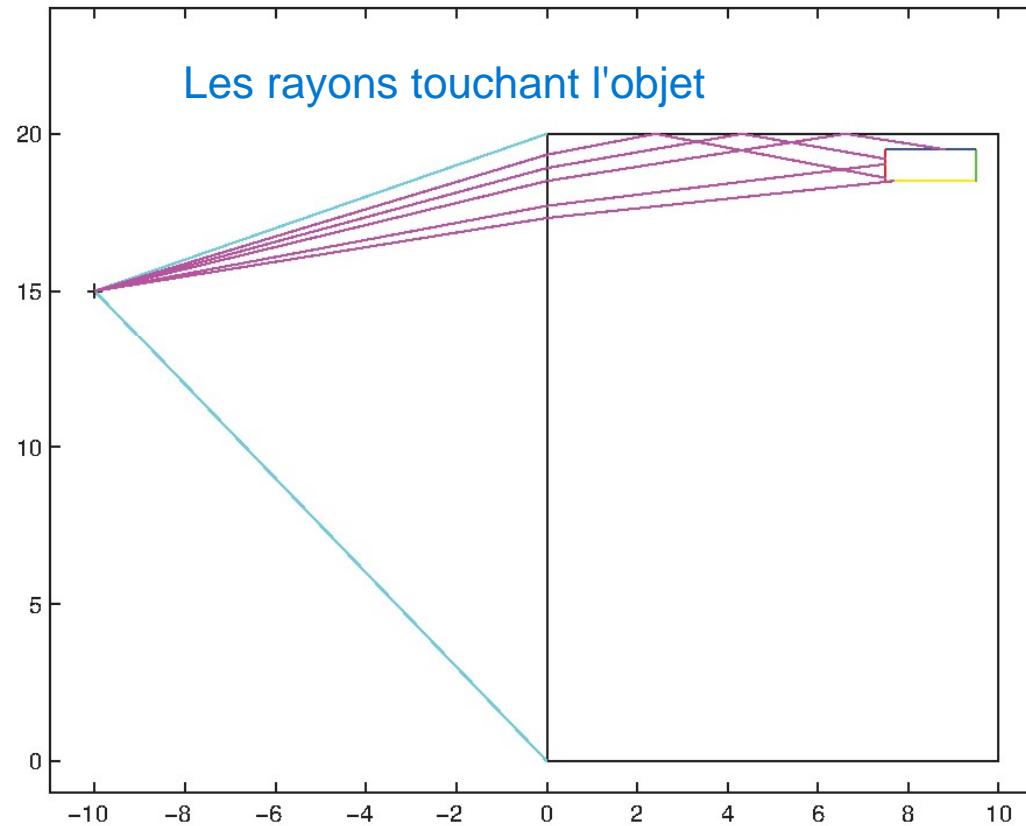
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Étape 3 : Identifier les rayons qui atteignent l'objet.



## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

L'étape suivante consiste à déterminer la position de l'objet tel que vu par l'observateur.

- Déterminer le vecteur donnant la direction initiale du rayon de lumière à partir de l'oeil

$$\vec{u} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_0}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_0|}$$

Ce vecteur donne la direction finale d'où provient la lumière lorsqu'elle touche l'oeil et donc la direction où apparaîtra l'image.

$$U_i = \sin(\theta) \cos(\phi) i + \sin(\theta) \sin(\phi) j + \cos(\theta) k$$

## Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- Déterminer la distance  $d$  parcourue par la lumière

$$d = \sum_i^N |\vec{r}_i - \vec{r}_{i-1}|$$

- Le point de l'objet touché apparaît pour l'observateur à la position

$$\vec{r}_p = \vec{r}_0 + d \vec{u}$$

- Répéter pour tous les points jusqu'à formation de l'image.

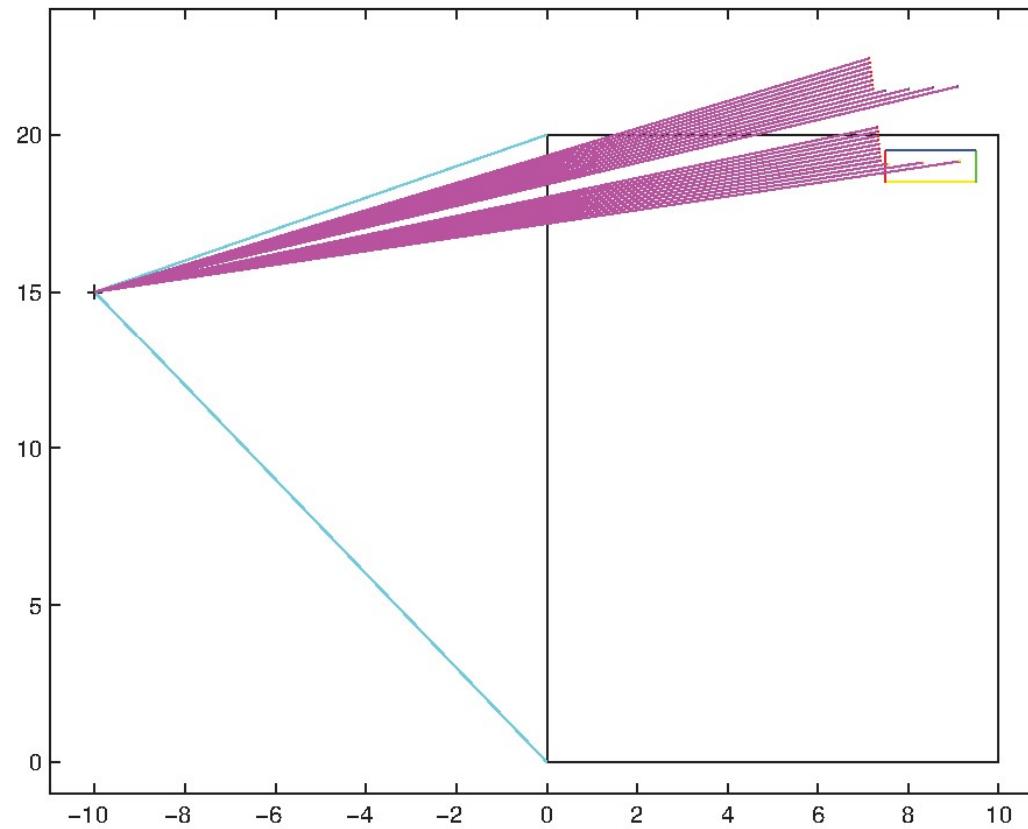
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Étape 4 : Tracer les rayons tels que perçus par l'observateur.



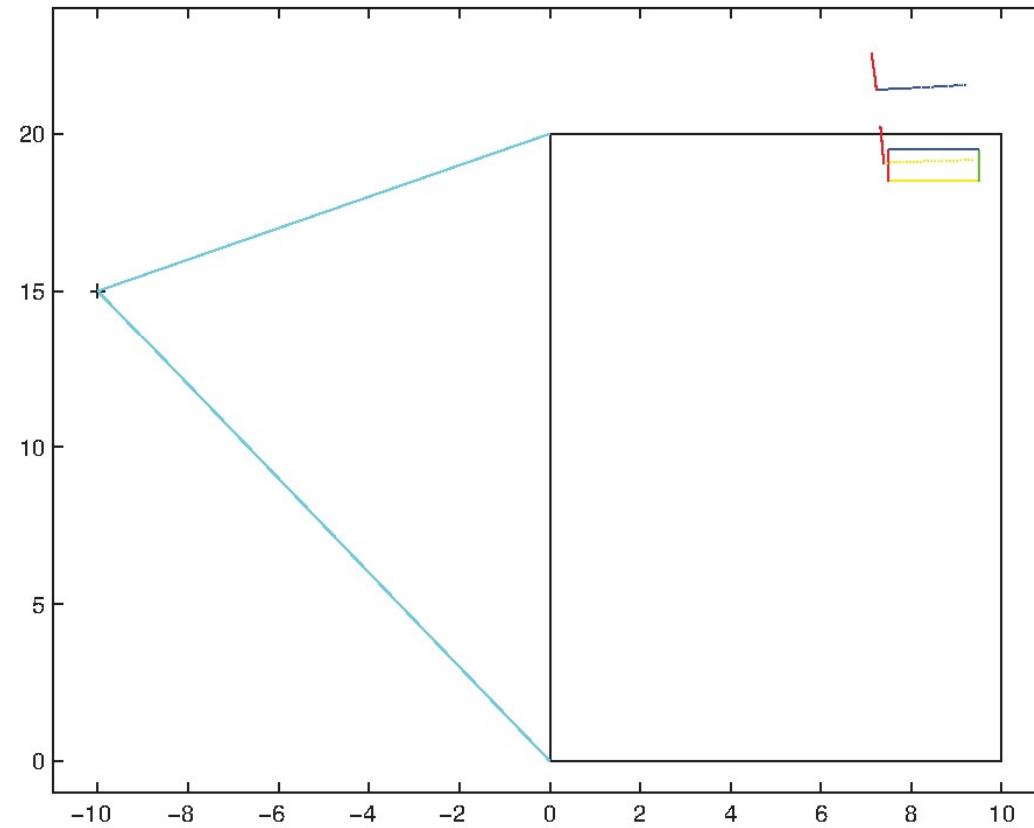
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Étape 5 : Tracer l'image réelle et les images virtuelles.



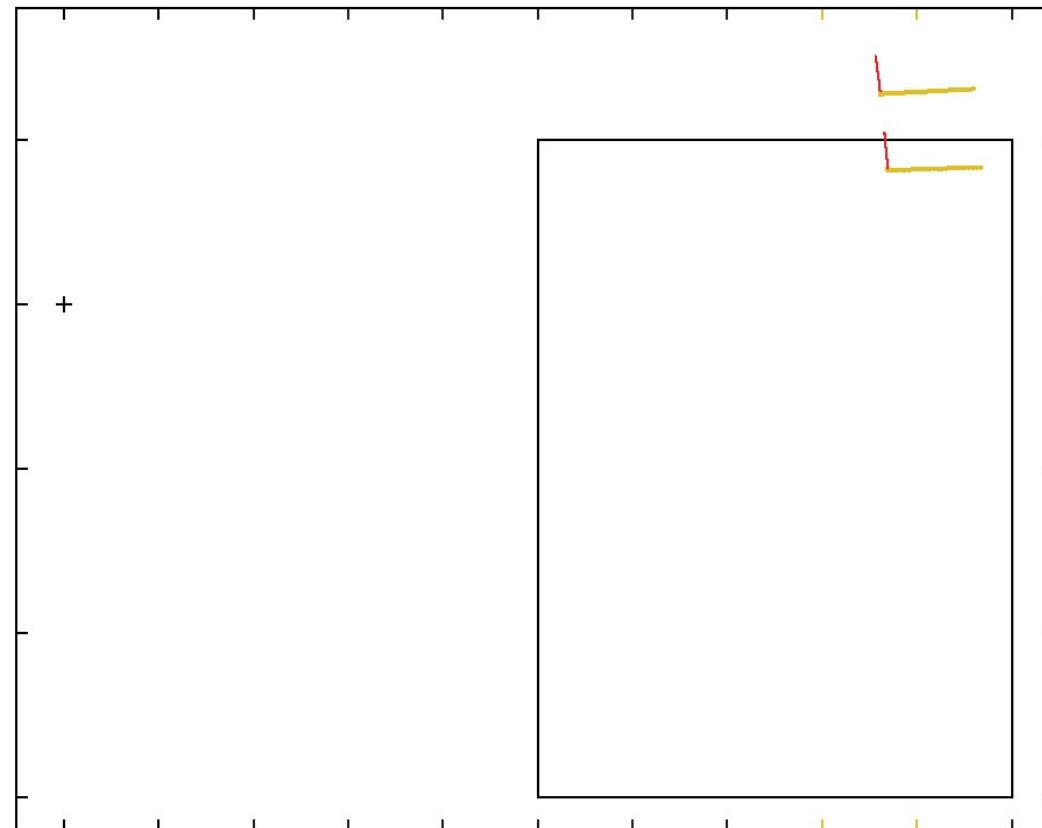
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Étape 6 : Ce que voit l'observateur.

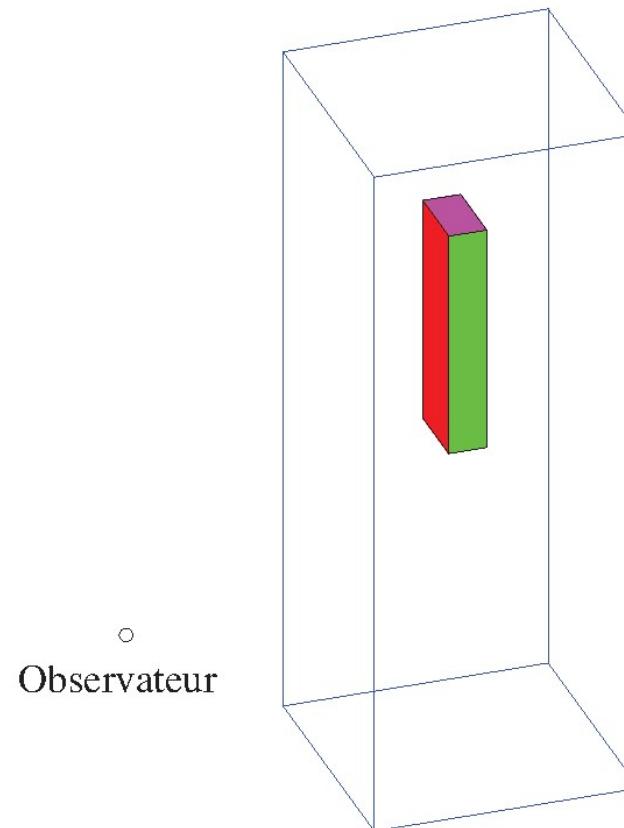


Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Exemple 3D.

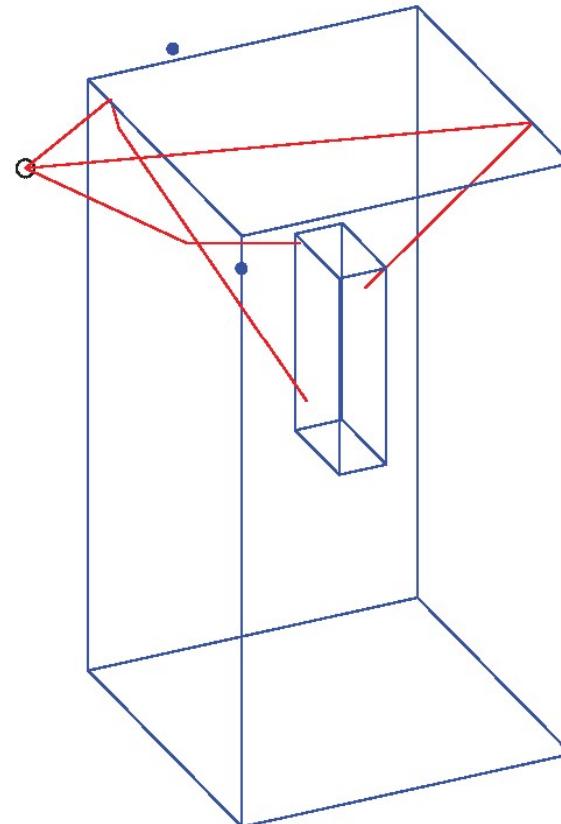


Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Quelques lignes en 3D.



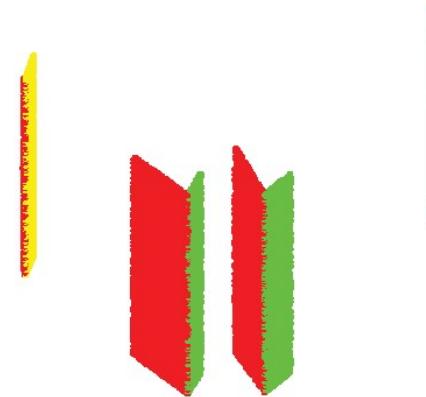
# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Image reconstruite en 3D



o

## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Nous venons d'étudier la réflexion et la réfraction en supposant que :

- nous avions une surface parfaite ;
- l'intensité de la lumière réfléchie ou réfractée était égale à l'intensité incidente ;
- pour la lumière réfléchie par un miroir

$$\sin \theta_r = \sin \theta_i$$

- pour la lumière réfractée

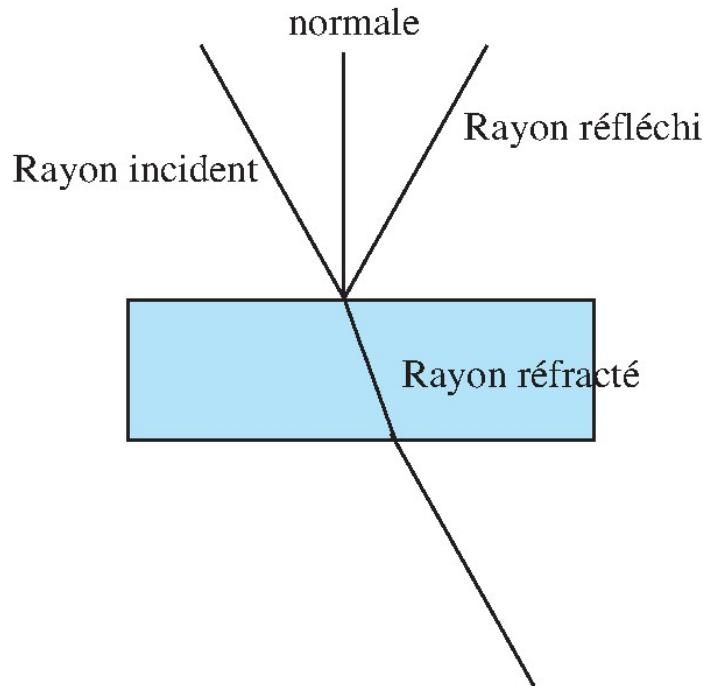
$$n_t \sin \theta_t = n_i \sin \theta_i$$

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Réflexion et réfraction par une surface parfaite.

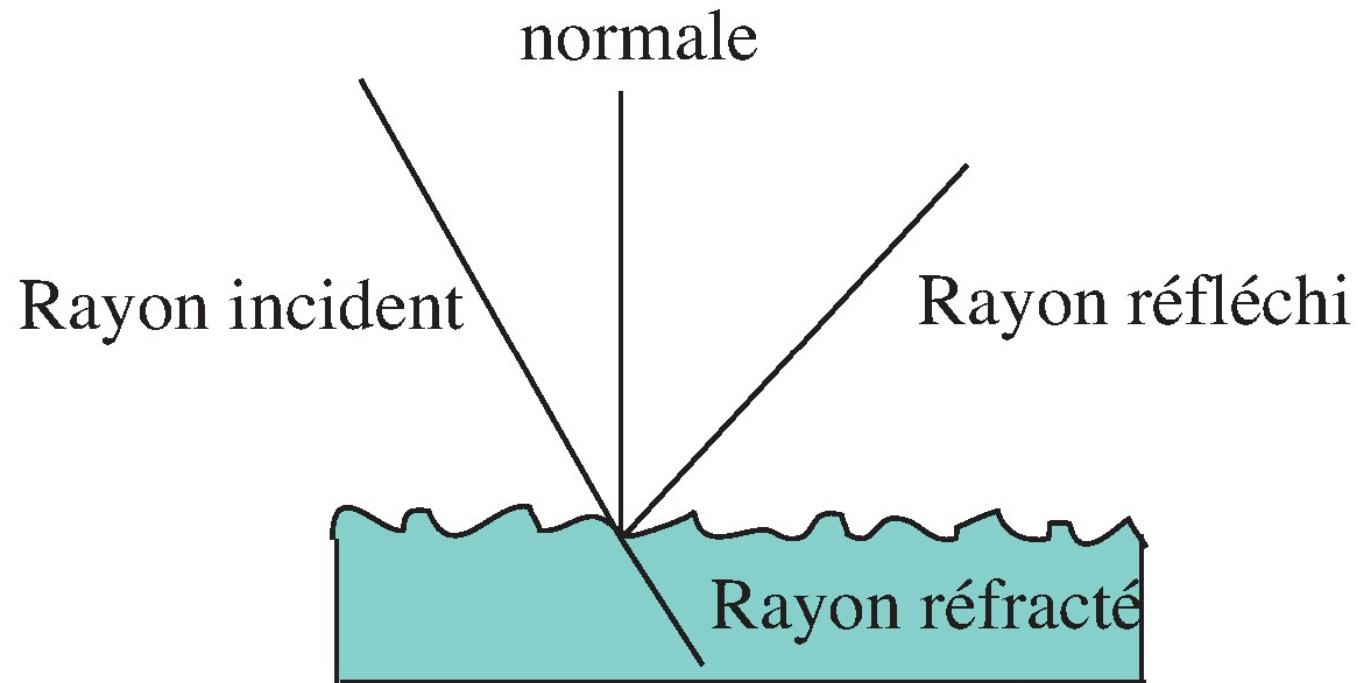


## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Réflexion et réfraction par une surface imparfaite.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Pour les surfaces parfaites :

- ce n'est pas nécessairement toute la lumière que sera transmise à travers une surface transparente et en général une partie de la lumière sera réfléchie et une partie transmise ;
- les coefficients de réflexion et de transmission dépendent alors de la polarisation de la lumière.

Pour les surfaces imparfaites :

- les lois de Snell-Descartes demeurent valides même pour les surfaces imparfaites, cependant il faut déterminer la normale à la surface à chaque point, ce qui peut être problématique ;
- nous verrons plus loin comment simuler le comportement des rayons lumineux qui atteignent des surfaces imparfaites.

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Pour toute surface :

- si on considère les photons comme des particules de lumière, alors ces particules interagissent avec les molécules composant les deux milieux ;
- lorsque la lumière passe du vide à un milieu plus dense, certains des photons seront réfléchis après interaction avec les molécules à l'interface entre le vide et le milieu réfractant ;
- certains des photons seront transmis à travers l'interface ;
- certains des photons peuvent aussi être absorbés par les molécules ;
- ces photons absorbés mèneront à une augmentation de la température des molécules près de l'interface ;
- on aura alors une diminution de l'intensité de lumière pouvant être réfléchie ou transmise.

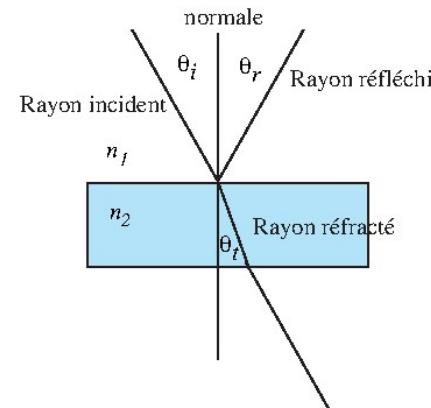
# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Intensité de la lumière transmise et réfléchie par une surface parfaite

- Pour déterminer les coefficients de transmission et de réflexion de la lumière à l'interface entre deux milieux, il faut retourner à une analyse ondulatoire de la lumière.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Intensité de la lumière transmise et réfléchie par une surface parfaite

- La lumière peut être représentée par une combinaison de champs électrique et magnétique

Champ électrique  $\vec{\mathcal{E}} = \mathcal{E} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \vec{e}$

Champ magnétique  $\vec{\mathcal{H}} = \frac{1}{i\omega\mu} (\vec{k} \times \vec{\mathcal{E}}) = \mathcal{H} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \vec{h}$   
perpendiculaire au champ électrique

avec  $\vec{k} = 2\pi \vec{u} / \lambda$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\vec{u}$  un vecteur unitaire indiquant la direction de propagation de l'onde.

- L'intensité (énergie) de la lumière incidente est donnée par

$$I_i = \frac{1}{8\pi} (\varepsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2)$$

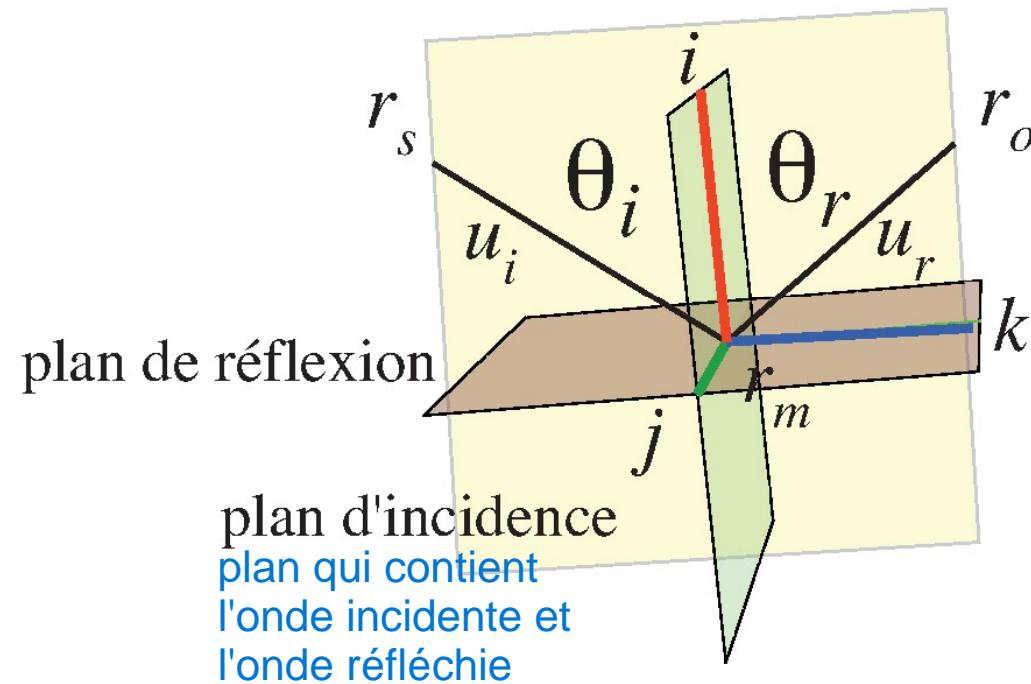
Onde magnétique perpendiculaire aux deux plans (perpendiculaire au champ électrique et perpendiculaire au champ magnétique)

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Notation.

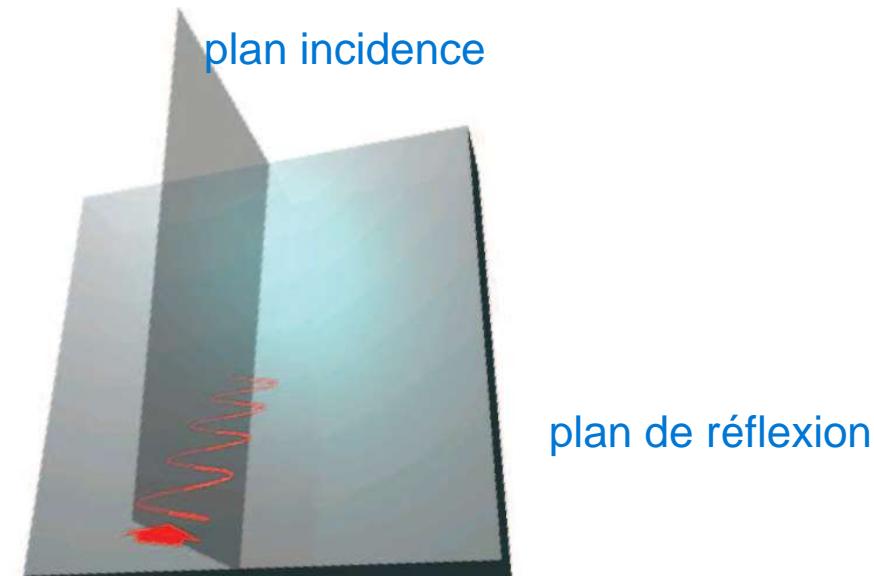


# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Direction du champ électrique pour des ondes transverses électriques (TE).



Transverse électrique:  
champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Relations de Fresnel

- Si le champ électrique incident est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ( $\vec{e} \propto \vec{j}$ ) on a des ondes transverses électriques (TE) et les coefficients de réflexion  $R_{\text{TE}}$  et de transmission  $T_{\text{TE}}$  sont donnés par

Transverse électrique:

Champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence (et parallèle au plan de réflexion)!

Champ magnétique est parallèle au plan d'incidence!

$$R_{\text{TE}} = \left[ \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2$$

Compris entre 0 et 1. Si 1, rayon n'est pas réflchi

$$T_{\text{TE}} = 1 - R_{\text{TE}}$$

Entre 0 et 1. Si 1 rayon n'est pas transmis.

- Les intensités de la lumière réfléchie  $I_r$  et transmise  $I_t$  seront

$$I_r = I_i R_{\text{TE}}$$

$$I_t = I_i T_{\text{TE}} = I_i (1 - R_{\text{TE}})$$

$$\frac{I_t}{I_r} = (1 - R) / R$$

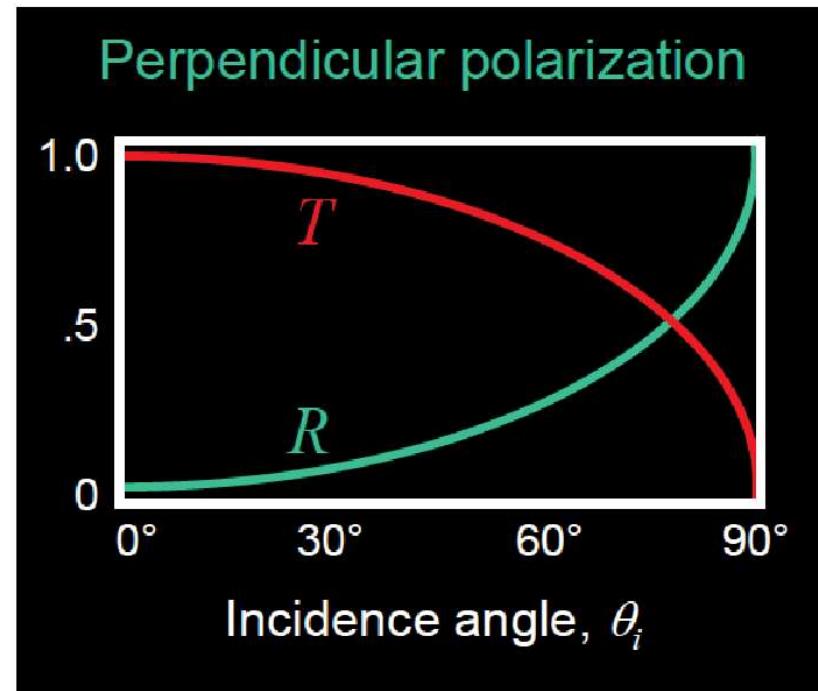
## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Coefficients de réflexion et de transmission pour les ondes TE à l'interface air-verre.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- Si le champ magnétique incident est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ( $\vec{h} \propto \vec{j}$ ), on a des ondes transverses magnétiques (TM) et les coefficients de réflexion  $R_{\text{TM}}$  et de transmission  $T_{\text{TM}}$  sont donnés par

Transverse magnétique:

Le champ magnétique est perpendiculaire au plan d'incidence!

Champ électrique est parallèle au plan d'incidence!

$$R_{\text{TM}} = \left[ \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2$$

$$T_{\text{TM}} = 1 - R_{\text{TM}}$$

- Les intensités de la lumière réfléchie  $I_r$  et transmise  $I_t$  seront alors

$$I_r = I_i R_{\text{TM}}$$

$$I_t = I_i T_{\text{TM}} = I_i (1 - R_{\text{TM}})$$

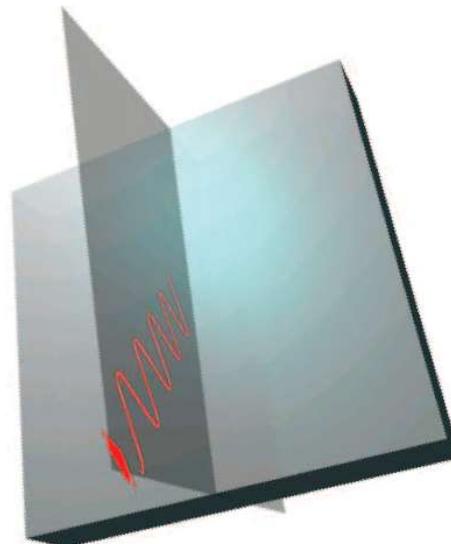
## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Direction du champ électrique pour des ondes transverses magnétiques (TM).



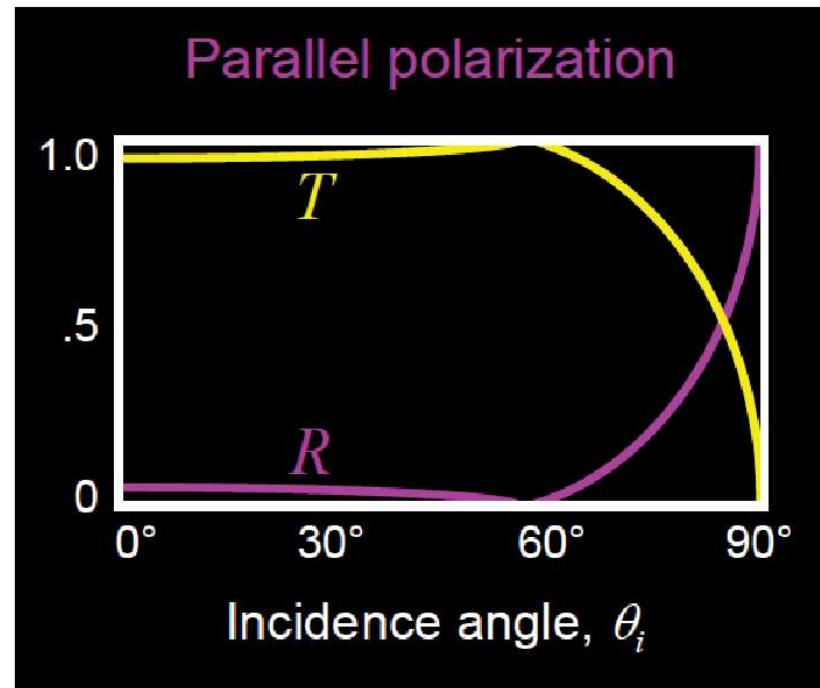
# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Coefficients de réflexion et de transmission pour les ondes TM à l'interface air-verre.



# Réflexion diffuse et absorption

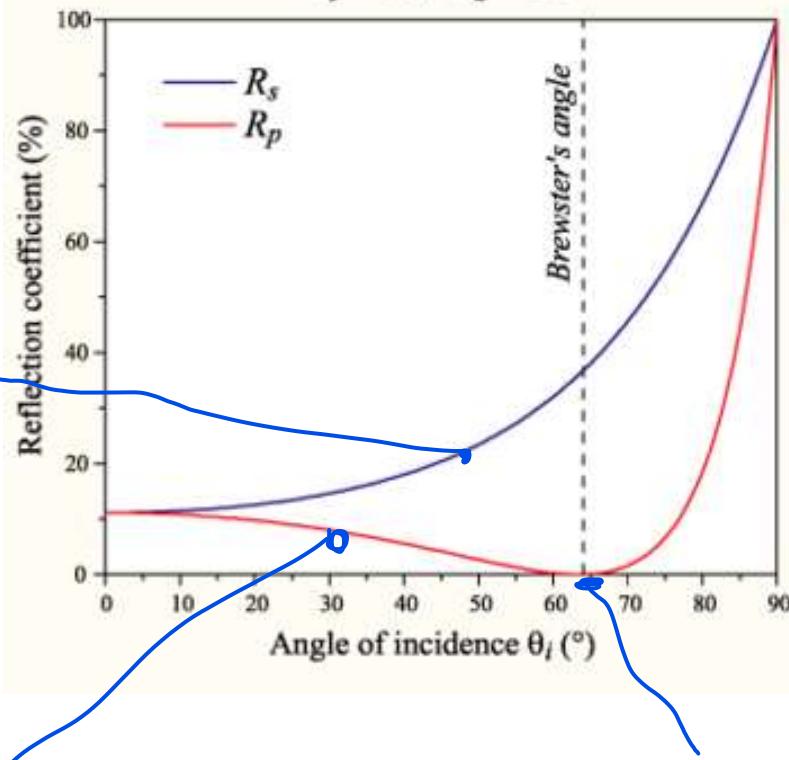
Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

transverse électrique

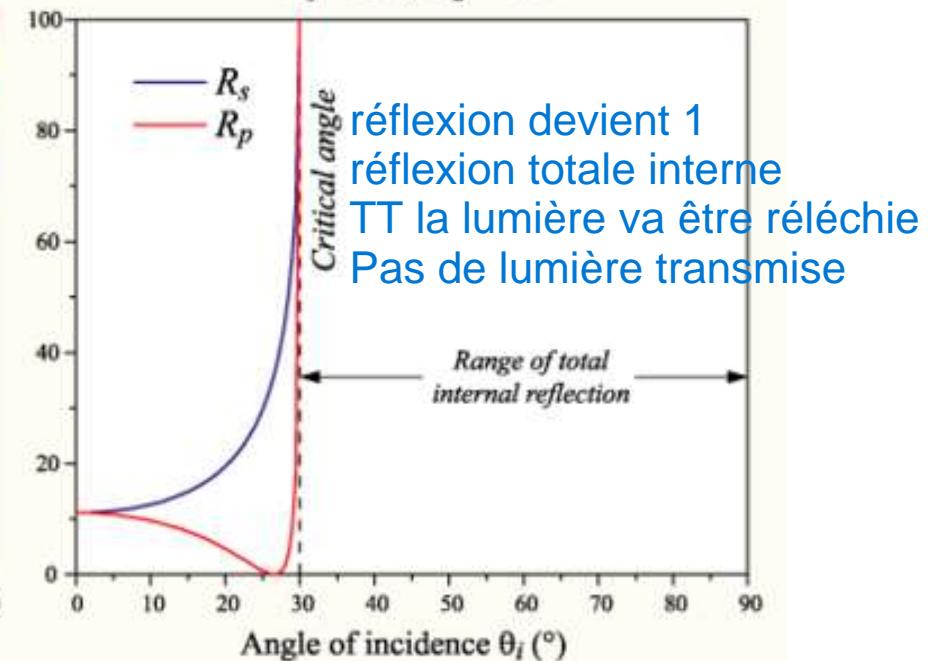
transverse magnétique

$$n_1 = 1.0, n_2 = 2.0$$



angle pour lequel le rayon est complètement transmis

$$n_1 = 2.0, n_2 = 1.0$$



réflexion devient 1  
réflexion totale interne  
TT la lumière va être réléchie  
Pas de lumière transmise

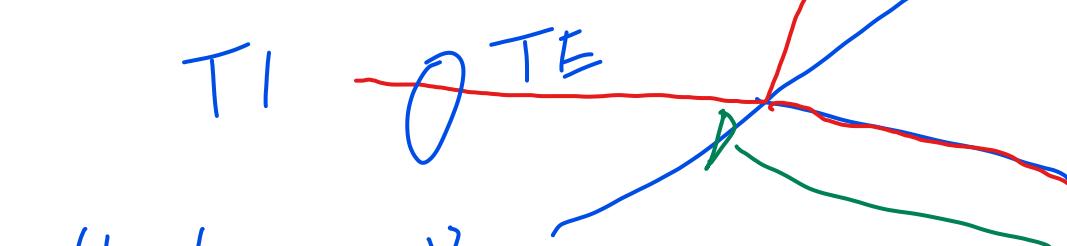
## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

quasiment toute l'intensité est transmise  
Peu est réfléchie

- $R = 0.04$
- $T = 0.96$



$$R_{TM} = \left( \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right)^2$$

Si  $\theta_i \rightarrow 0$  alors  $\theta_t \rightarrow 0$   
 $\sin \theta_i \approx 0_i$  et  $\sin \theta_t \approx \theta_t$

$$R_{TE} = \left( \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right)^2$$

## Réflexion diffuse et absorption

$$\theta_t = \frac{n_i}{n_t} \theta_i - R_{TE} = \left( \frac{\theta_t - \theta_i}{\theta_t + \theta_i} \right)^2$$

$$= \left( \frac{\frac{n_i}{n_t} \theta_i - \theta_i}{\frac{n_i}{n_t} \theta_i + \theta_i} \right)^2$$

- Dans le cas général, on supposera que la lumière n'est pas polarisée (combinaison égale d'ondes TE et TM) et, on utilisera (relations de Fresnel)

R probabilité que mon rayon soit réfléchi

$$R = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 + \left[ \frac{\tan(\theta_t - \theta_i)}{\tan(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 \right\}$$

$$= \left( \frac{\frac{n_i}{n_t} - 1}{\frac{n_i}{n_t} + 1} \right)^2$$

T probabilité que mon rayon soit transmis

$$T = 1 - R$$

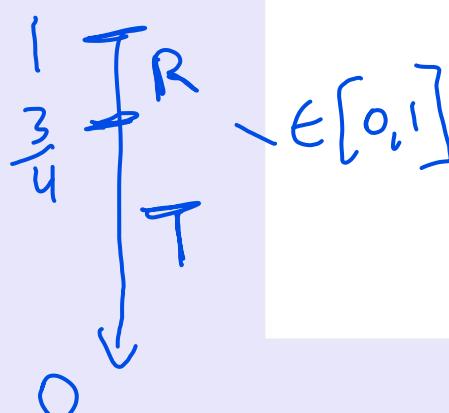
$$= \left( \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2$$

- Les intensités respectives de la lumière réfléchie  $I_r$  et transmise  $I_t$  seront

$$I_r = I_i R$$

$$I_t = I_i (1 - R)$$

Si  $x > T \rightarrow$  trajet de R (rayon réfléchi)  
 Si  $x < T \rightarrow$  trajet de T (rayon transmis)

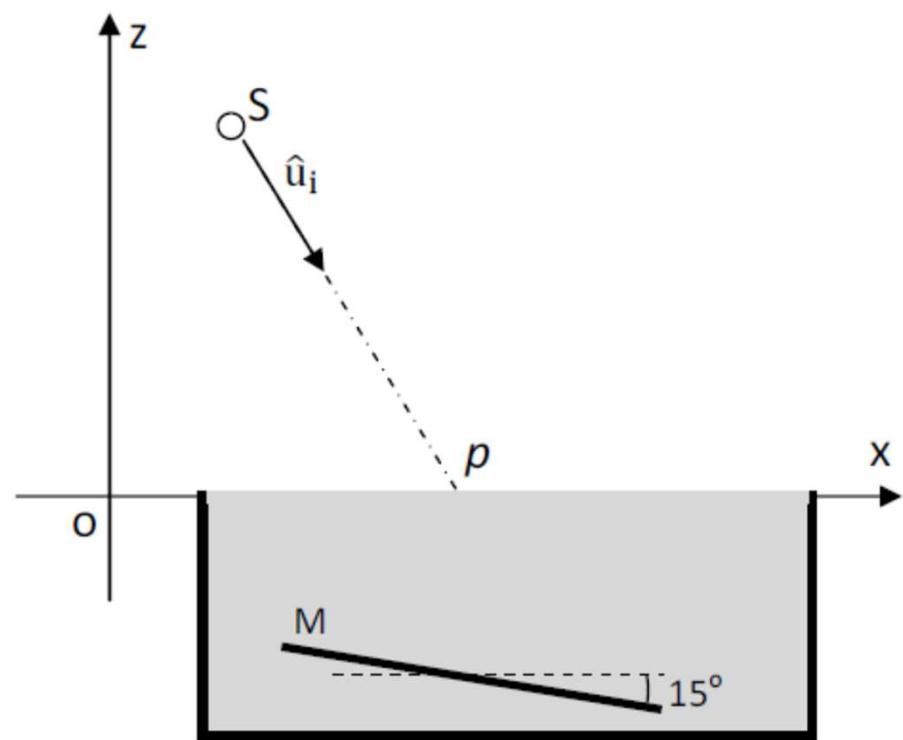


# ANCIEN EXAMEN

## Question 3. Réflexion et réfraction de la lumière (20 points)

Un rayon lumineux polarisé d'intensité  $I_0$  provenant d'une source S située à  $\vec{r}_s = (1.0, 0.0, 3.0)$  (m) se propage dans l'air suivant une direction définie par son vecteur unitaire  $\hat{u}_i = (\frac{1}{2}, 0.0, -\frac{\sqrt{3}}{2})$ . Ce rayon intercepte une surface d'eau contenue dans un bac. La surface de l'eau, considérée parfaitement plane est dans le plan  $z = 0$ . La polarisation du rayon lumineux est de type TE (Le champ électrique parallèle à l'axe y)

- (a) (5 points) Quelle est la position  $\vec{r}_p$  du point p d'impact du rayon avec la surface de l'eau.
- (b) (10 points) Déterminer le vecteur unitaire  $\hat{u}_r$  du rayon réfléchi par la surface de l'eau ainsi que son intensité relative  $I_r/I_0$  sachant que les indices de réfraction de l'eau et de l'air sont :  $n_{eau} = 1.4$  et  $n_{air} = 1.0$ .
- (c) (5 points) Un miroir M est disposé au fond du bac de façon à réfléchir la portion transmise du rayon initial. Ce miroir est orienté d'un angle  $\vec{\Omega}(0, 15^\circ, 0)$  par rapport à la position horizontale (voir schéma ci dessous). Le rayon transmis revient vers la surface de l'eau après avoir subi une réflexion sur le miroir. Ce rayon va-t-il ressortir de l'eau ou pas? Justifier votre réponse.



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Réflexion d'une surface imparfaite

Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour représenter la réflexion diffuse, dont les modèles empiriques suivants :

- la diffusion totale (modèle de Lambert) ;
- la réflexion spéculaire imparfaite ;
- le modèle de Phong (combinaison de diffusion totale et de réflexion spéculaire imparfaite).

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

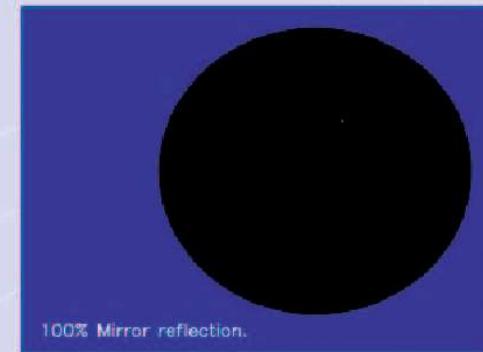
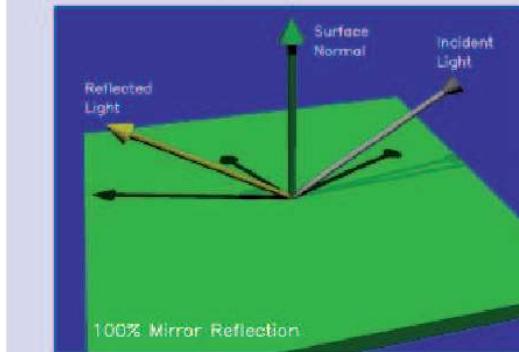
Réflexion diffuse et absorption

On peut aussi utiliser des modèles plus physiques basés sur la loi de Descartes :

- on doit alors simuler la microgéométrie de la surface ;
- dans ces cas, il faut aussi utiliser un modèle d'ombrage, d'absorption et d'éblouissement.

Modèle de Descartes.

- Miroir parfait (loi de Descartes)

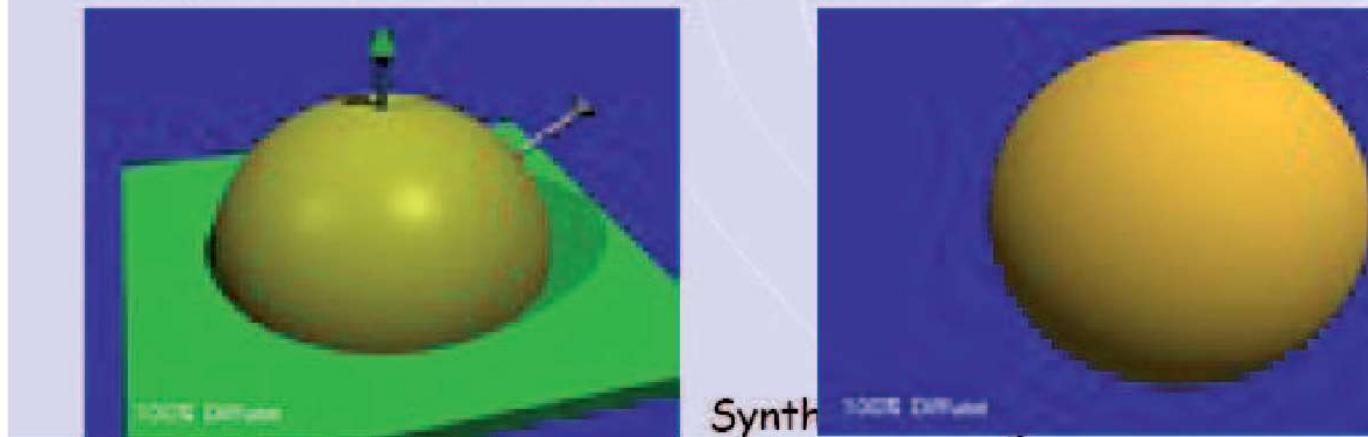


Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Modèle de Lambert.

- Diffusion totale (loi de Lambert)



partie de derrière je la vois moins exposé à la lumière

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Diffusion totale (modèle de Lambert) :

- le principe qui sous-tend ce modèle est que la luminosité apparente d'une surface perçue par un observateur est indépendante de son angle d'observation par rapport à la normale au plan ;
- cette supposition mène à la loi des cosinus

$$I_{\text{diffuse}} = k_{d,c} I_i (\vec{L} \cdot \vec{n}) = k_{d,c} I_i \cos \theta$$

- $I_{\text{diffuse}}$  est l'intensité de la lumière diffuse perçue par l'observateur ;

## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

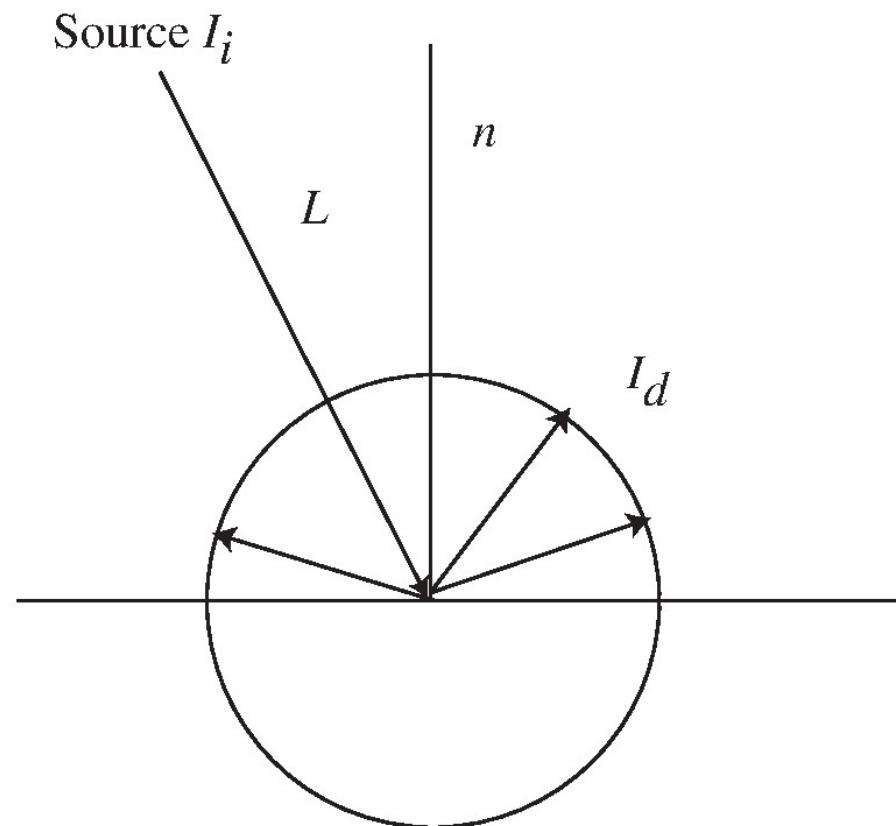
- $I_i$  est l'intensité de la lumière incidente et  $\vec{L}$  sa direction ;
- $\vec{n}$  est la normale à la surface au point de réflexion ;
- $\theta$  est l'angle entre la normale à la surface et la direction de la source ;
- la constante  $k_{d,c}$  représente la diminution de l'intensité de la lumière et est fonction de la couleur de la surface réfléchissante.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Réflexion diffuse



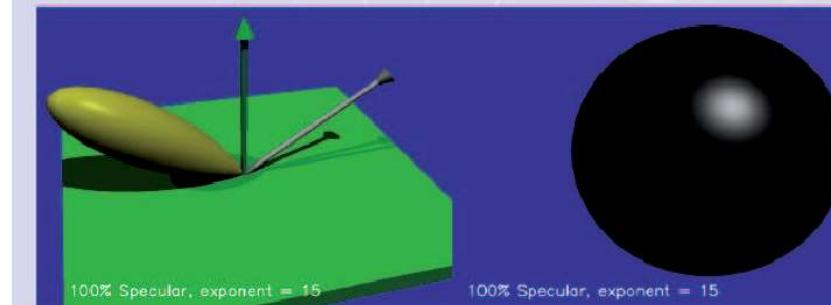
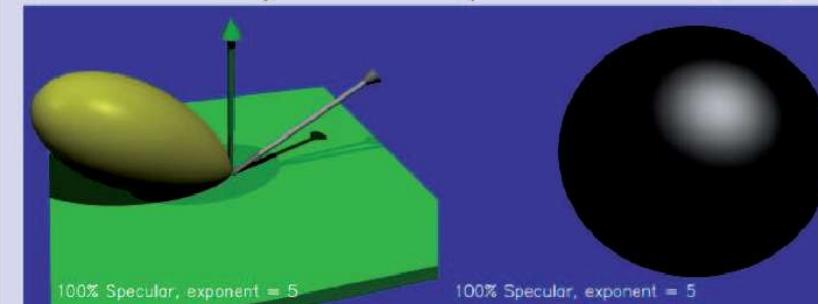
# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Modèle de réflexion imparfaite.

- Réflecteur spéculaire imparfait



Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Modèle de réflexion imparfaite

- Ce modèle correspond à une distribution d'intensité autour de la direction spéculaire de réflexion  $\vec{R}$  (modèle de Descartes).
- Si on définit  $m$  la réflexivité de la surface, la composante spéculaire imparfaite sera alors donnée par

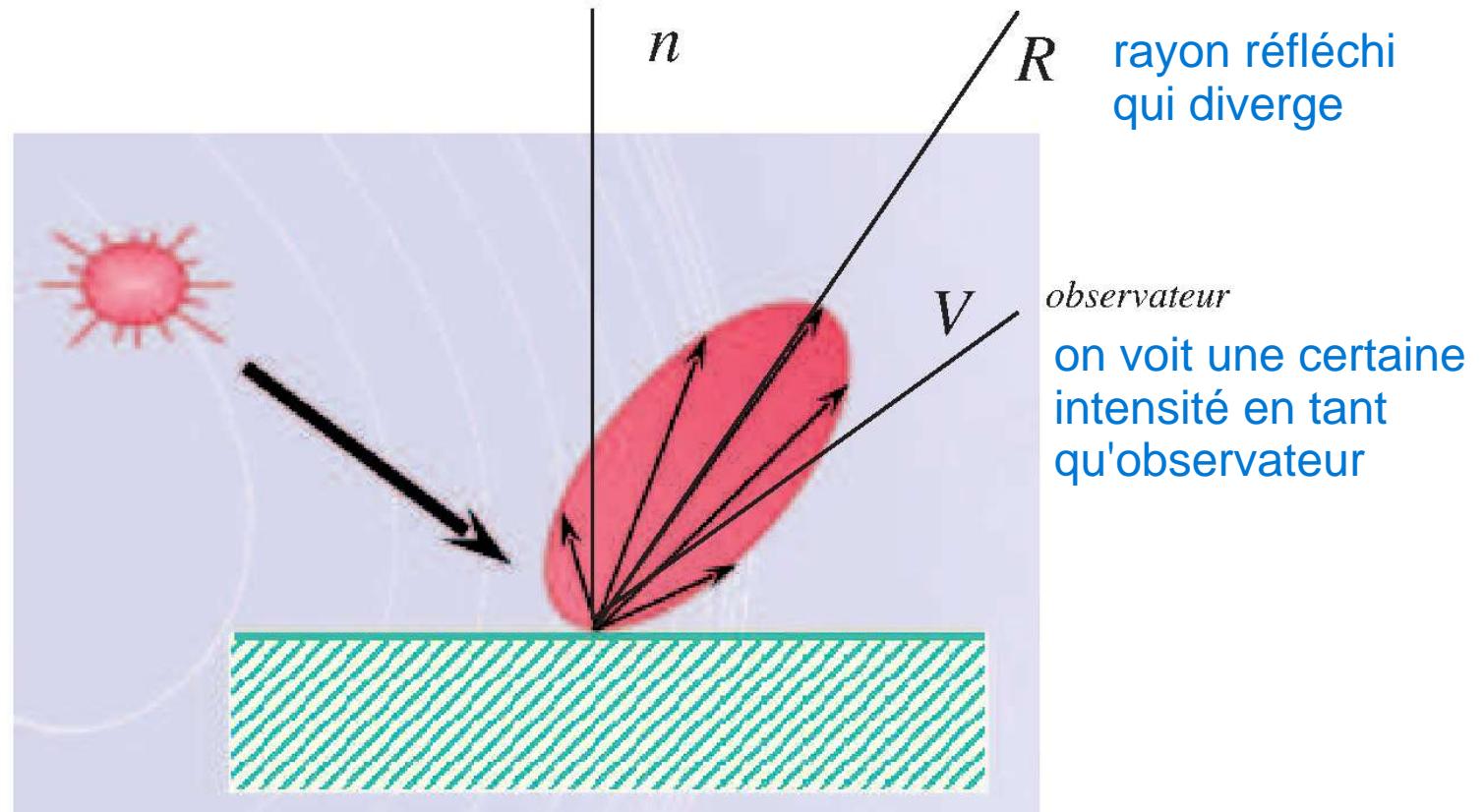
$$I_{\text{si}} = k_{\text{si},c} I_i (\vec{R} \cdot \vec{V})^m$$

- La constante  $k_{\text{si},c}$  représente la diminution de l'intensité de la lumière et est fonction de la couleur de la surface réfléchissante.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Réflexion imparfaite



## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

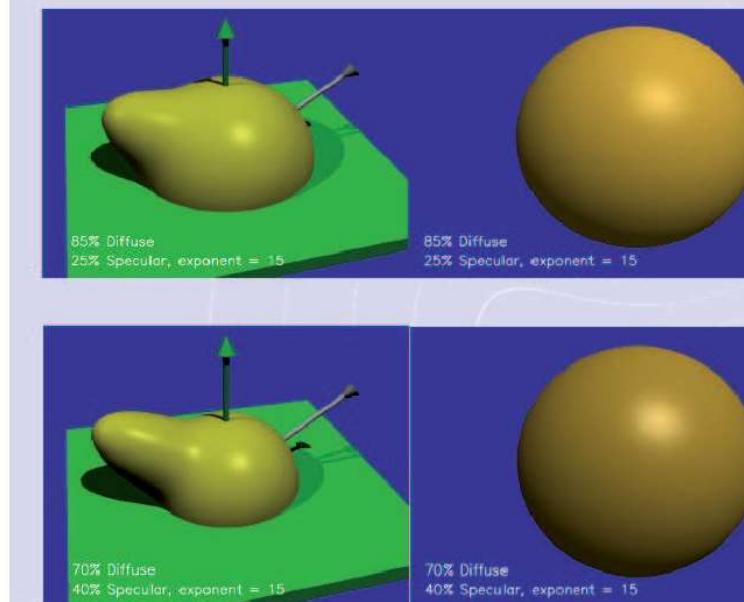
- Lorsque  $m$  est faible ( $m = 1$  par exemple), la lumière est distribuée de façon diffuse autour de  $\vec{R}$ .
- Lorsque  $m$  est élevé ( $m \gg 1$ ), la lumière est concentrée autour de  $\vec{R}$ .
- Lorsque  $m$  est infini ( $m = \infty$ ), on retrouve la loi de Descartes (la lumière est émise seulement dans la direction  $\vec{R}$ ).

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

## Combinaison de modèles de Lambert et de réflexion imparfaite.

- Spécularité et diffusion



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Modèle de Phong

- Ici, on suppose que la diffusion correspond à une combinaison des modèles de diffusion totale et de diffusion spéculaire imparfaite.
- On aura alors

$$I_{\text{Phong}} = k_{\text{diffuse}} I_{\text{diffuse}} + k_{\text{si}} I_{\text{si}}$$

avec

$$k_{\text{diffuse}} + k_{\text{si}} = 1$$

## Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

- Dans les cas où la surface correspond aussi à une source (effet de lumière ambiante) on aura

$$I_{\text{Phong}} = k_{\text{ambiante}} I_{\text{ambiante}} + k_{\text{diffuse}} I_{\text{diffuse}} + k_{\text{si}} I_{\text{si}}$$

avec

$$k_{\text{ambiante}} + k_{\text{diffuse}} + k_{\text{si}} = 1$$

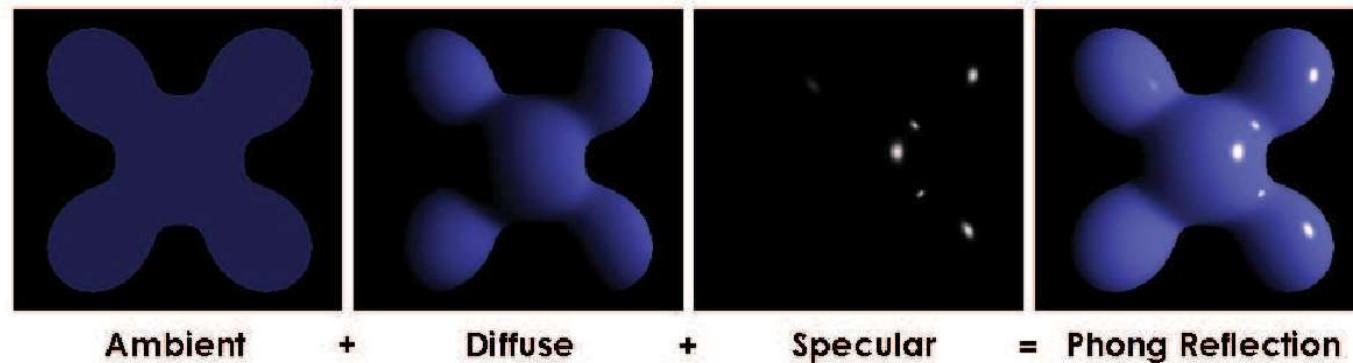
# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

## Modèle de Phong.



Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction

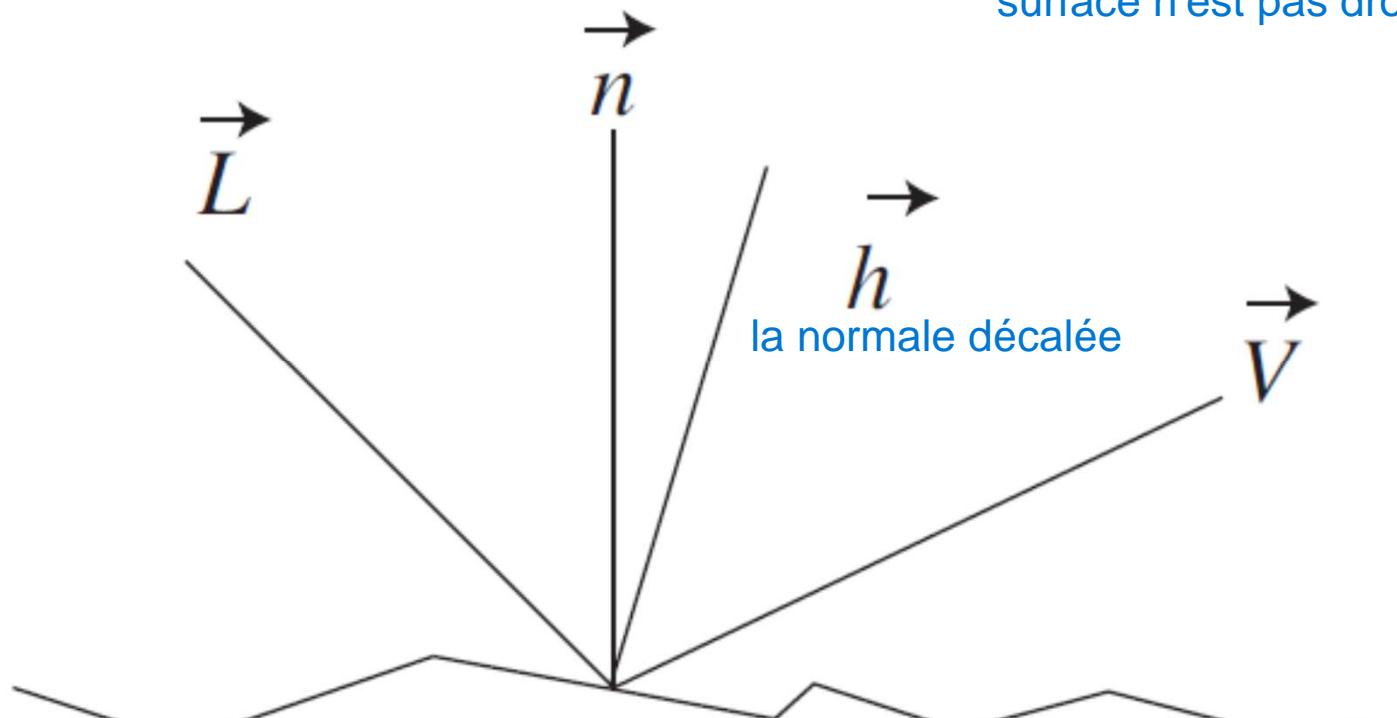
Réflexion diffuse

## Modèles de réflexion physique

- Dans ce cas, on simule la réflexion en utilisant exclusivement le modèle de Descartes.
- On utilise aussi un modèle de Fresnel approximatif pour prendre en compte le coefficient de réflexion de la lumière.
- La surface uniforme est remplacée par un ensemble de microsurfaces planes qui auront des orientations aléatoires.

Description de la lumière  
Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse

## Modèle de réflexion pour microsurfaces



Une surface est composé de microsurfaces

h: Normale est décalée car la surface n'est pas droite



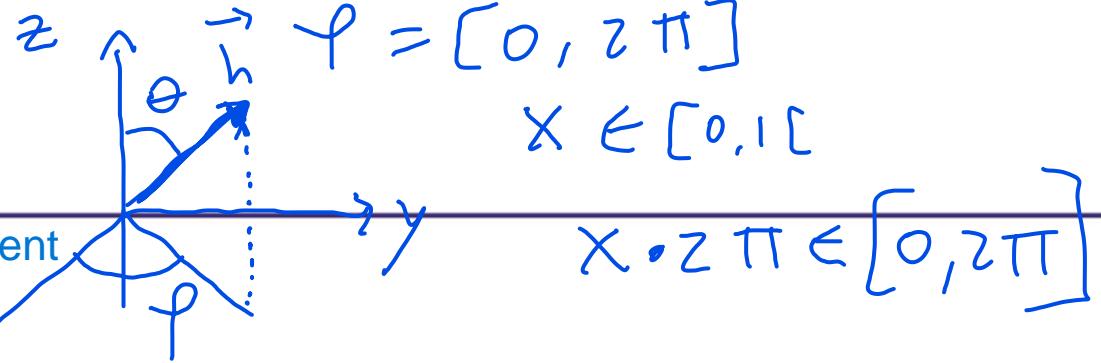
## Réflexion diffuse

tête et alpha sont générés aléatoirement

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse



### Microsurfaces

- Ici on remplace la surface (normale  $\vec{n}$ ) par un ensemble de microsurfaces ayant des directions (normales  $\vec{h}$ ) décrites par une distribution normale

sigma est l'écart type

$$D = k e^{-\left(\frac{(1-\vec{n} \cdot \vec{h})}{\sigma}\right)^2} = k e^{-\left(\frac{\alpha}{\sigma}\right)^2}$$

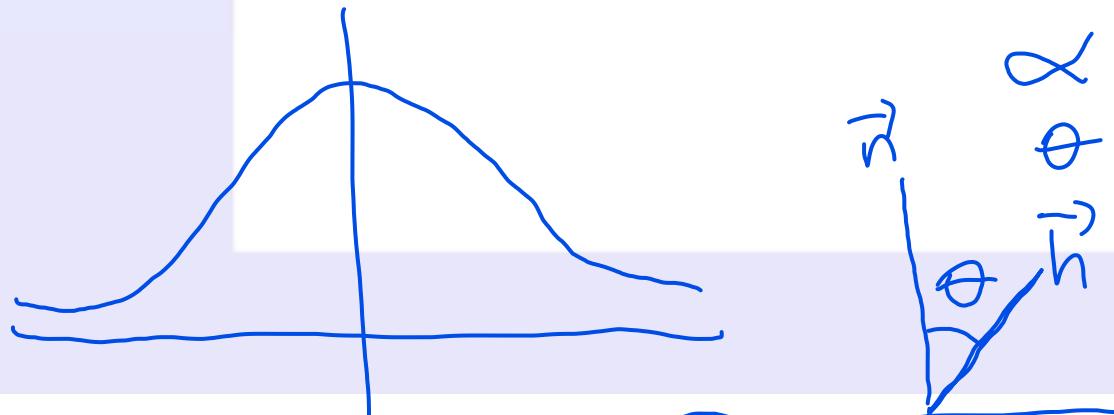
+ le sigma est petite, + la courbe devient pointue

- C'est une distribution gaussienne centrée à  $\alpha = (1 - \vec{n} \cdot \vec{h}) = 0$  et de largeur  $\sigma$ .
- Plus  $\sigma$  est grand, plus les variations d'angles seront élevées et plus la lumière sera réfléchie de façon diffuse.



On génère un alpha aléatoire qui obéit à la loi normale

$$\alpha = 1 - \cos \theta$$
$$\theta = \arccos(1 - \alpha)$$



Proba d'avoir un x

Je génère une loi normale