



PHS 4700  
**Physique pour les applications multimédia**

**Chapitre 9 — Optique**

G. Marleau

Automne 2016

# Table des matières

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

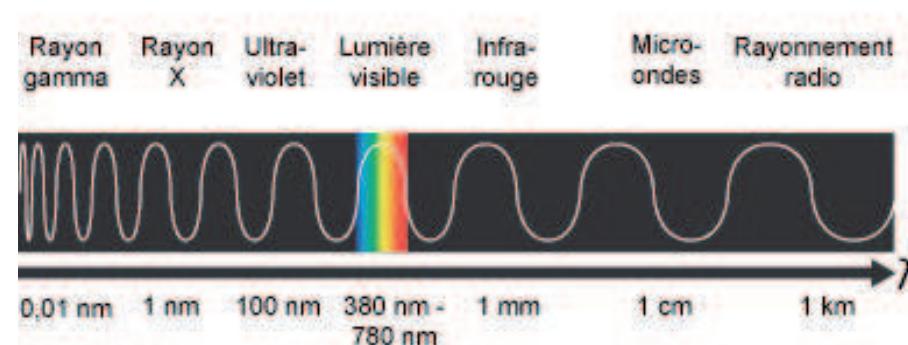
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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.



# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Les concepts de lumière comme onde électromagnétique et de couleur sont indissociables :

- 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 ;
- l'arc-en-ciel est composé de 7 couleurs (ordre de fréquences croissantes) : rouge, orange, jaune, vert, bleu, indigo et violet.

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

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Relation couleur longueur d'onde.

Couleur	longueur d'onde (nm)
Rouge	660-780
Orange	610-660
Jaune	560-610
Vert	510-560
Bleu	460-510
Indigo	440-460
Violet	400-440
Violet foncé	380-400

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

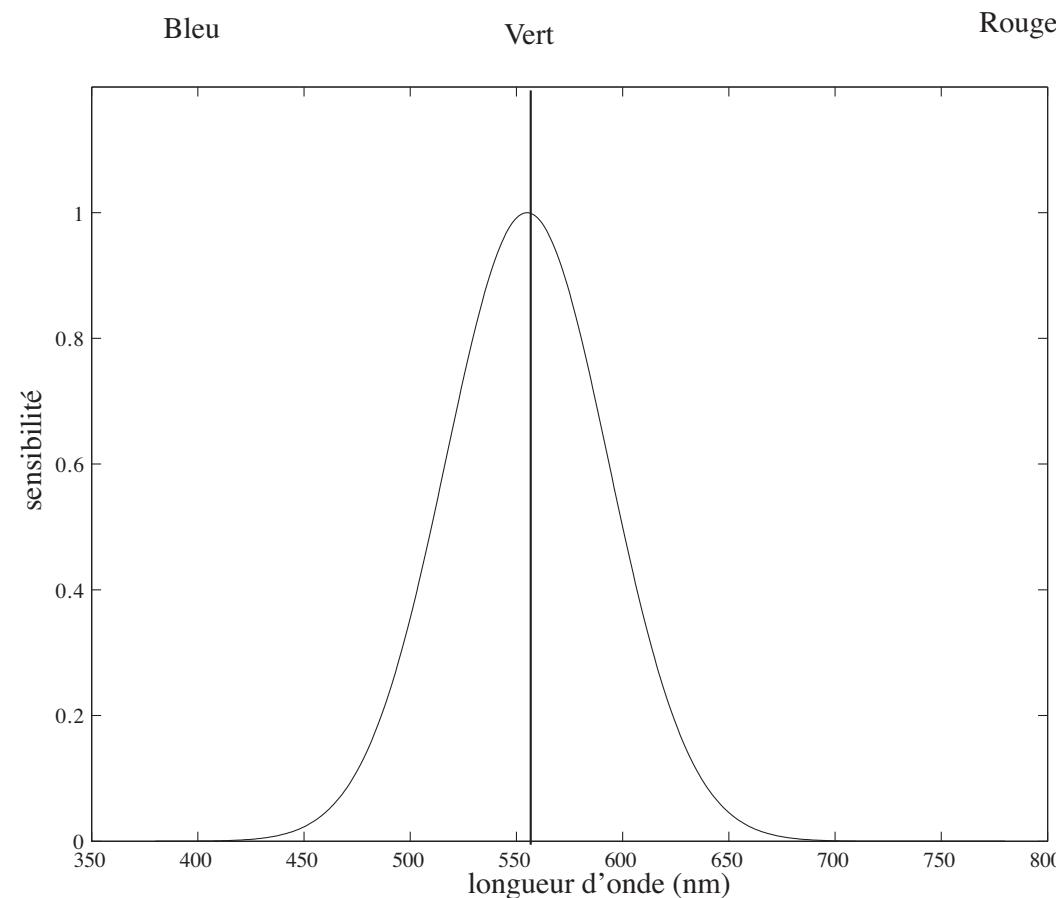
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Sensibilité de l'oeil aux couleurs le jour.



# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

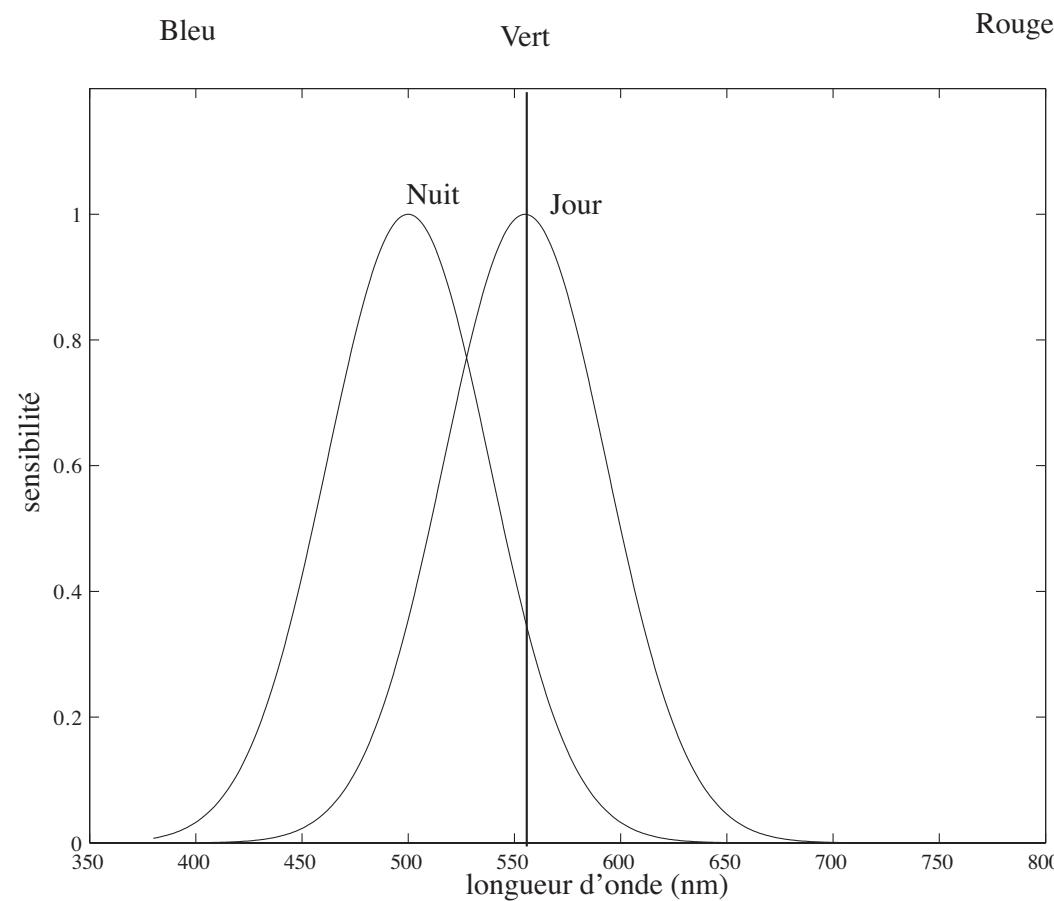
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Différences entre la sensibilité de l'oeil aux couleurs le jour (haute intensité lumineuse) et la nuit (faible intensité lumineuse).



# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

$$\nu\lambda = c$$

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

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

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

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

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

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

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

- l'indice de réfraction du vide correspond à  $n_{\text{vide}} = 1$  ;

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

Absorption

Ombres

Conclusions

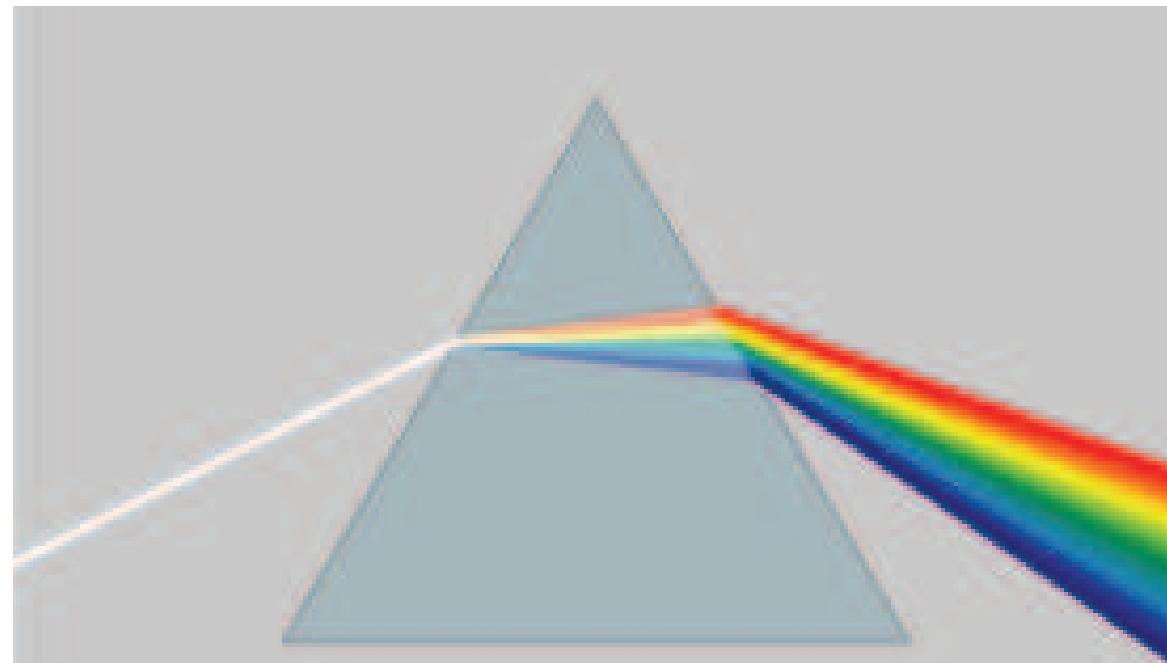
- l'indice de réfraction d'un milieu est généralement différent pour différentes fréquences de lumière, cette dépendance de  $n$  sur  $\lambda$  (ou  $\nu$ ) étant la source de la dispersion de la lumière blanche en différentes couleurs par un prisme ;
- en général, on spécifie l'indice de réfraction 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  
Absorption  
Ombres  
Conclusions

## Dispersion de la lumière blanche par un prisme.



*Décomposition de la lumière blanche à travers un prisme*

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et

absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Gaz	$n$	Liquide	$n$	Solide	$n$
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

Pour la lumière visible,  $n(\lambda)$  a la forme approximative suivante (loi de Cauchy)

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

$\lambda$ (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

Absorption

Ombres

Conclusions

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.

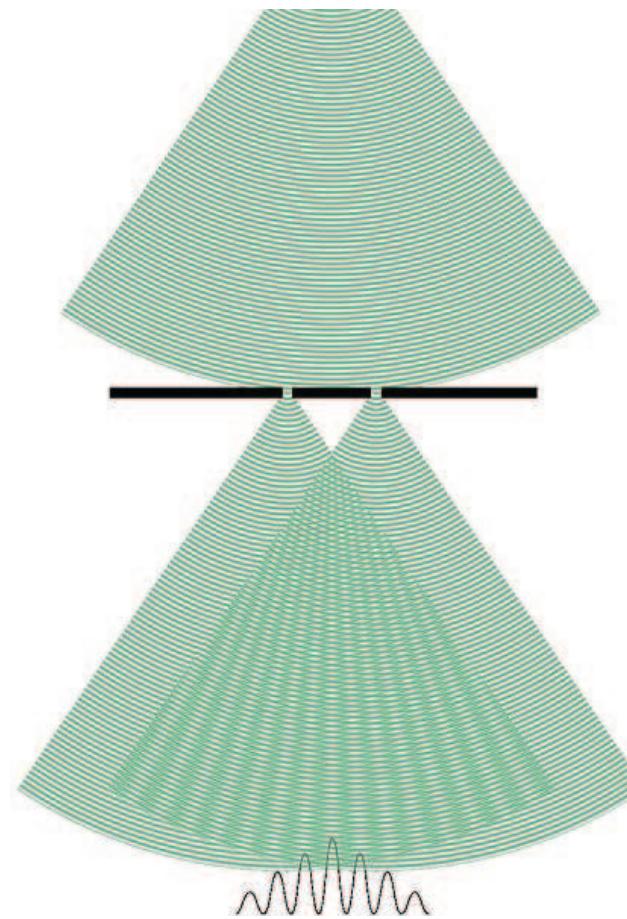
- Il représente la propagation d'une source lumineuse dans un milieu par un front d'onde sphérique.
- Il suppose que chaque point du front d'onde agit comme une source de lumière ponctuelle (un nouveau front d'onde sphérique) de même fréquence et phase que l'onde originale.

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption  
Absorption  
Ombres  
Conclusions

## Interférence.

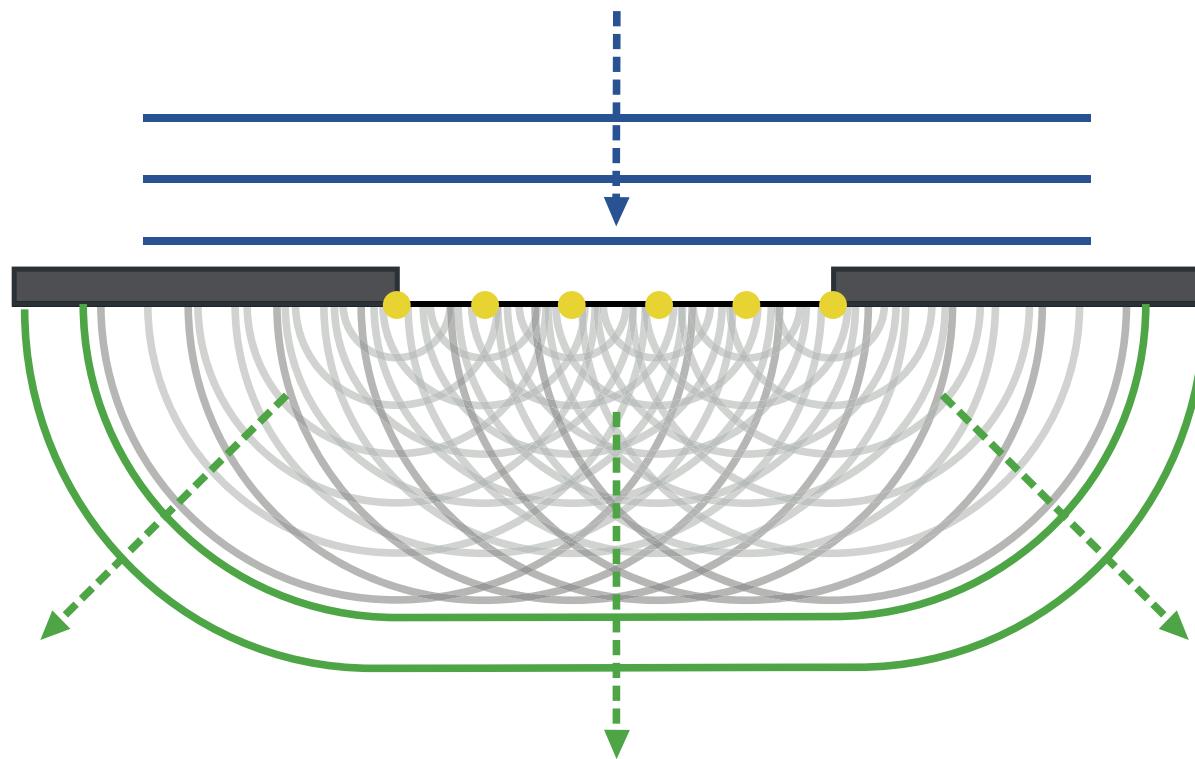


# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption  
Absorption  
Ombres  
Conclusions

## Diffraction par le principe d'Huygens.



# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Lumière et dualité onde particule.

- En 1887, Heinrich Rudolf Hertz décrit l'effet photoélectrique.
- En 1905, Albert Einstein explique cet effet en supposant que la lumière a un comportement corpusculaire et véhicule un quantum d'énergie (le photon).
- L'énergie d'un quantum de lumière de fréquence  $\nu$  est donnée par

$$E = h\nu$$

où  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  Js est la constante de Plank.

- Ceci explique pourquoi c'est la longueur d'onde de la lumière qui change lorsque le milieu change (la lumière ne perd pas d'énergie et doit donc avoir une fréquence constante).

# Description de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Lumière et onde.

- 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 (proportionnelle à  $\mathcal{E}^2 + \mathcal{B}^2$ ) correspond à l'énergie des  $N$  photons présents dans l'onde.

## Lumière et particule.

- La lumière se comporte comme une particule (photon d'énergie  $h\nu$ ) lorsqu'elle interagit avec des appareils microscopiques.

# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Pour les appareils macroscopiques avec  $d \gg \lambda$  ( $d$  correspond aux dimensions de l'objet).

- On utilise une interprétation ondulatoire. Ceci est requis afin de déterminer l'intensité de la lumière transmise et réfléchie par les objets (réflexion et réfraction).

Pour les appareils mésoscopiques ayant  $d \approx \lambda$ .

- On utilise une interprétation ondulatoire de la lumière. Ceci est requis afin de prendre en compte les effets d'interférence et de diffraction.

Pour les appareils microscopiques ( $d \ll \lambda$ ).

- On utilise une interprétation corpusculaire. Ceci est requis afin de prendre en compte les interactions des photons avec d'autres particules.

# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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 ;
- 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

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

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

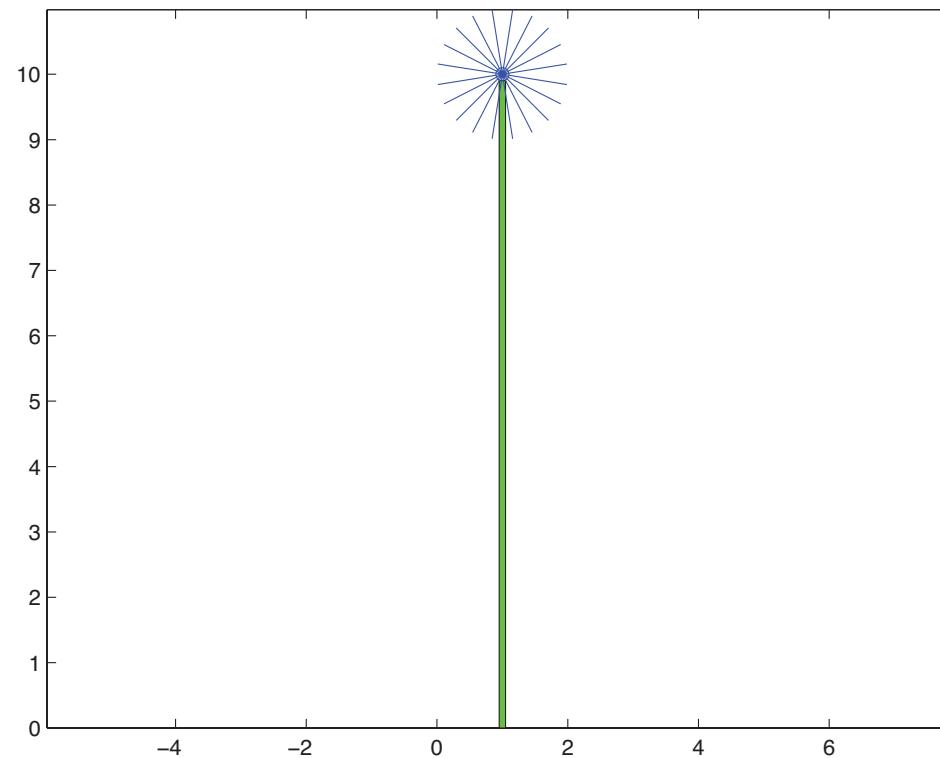
et l'intensité du signal lumineux diminue de façon équivalente (en 3D).

# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption  
Absorption  
Ombres  
Conclusions

## Variation d'intensité de la lumière près de la source.



# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

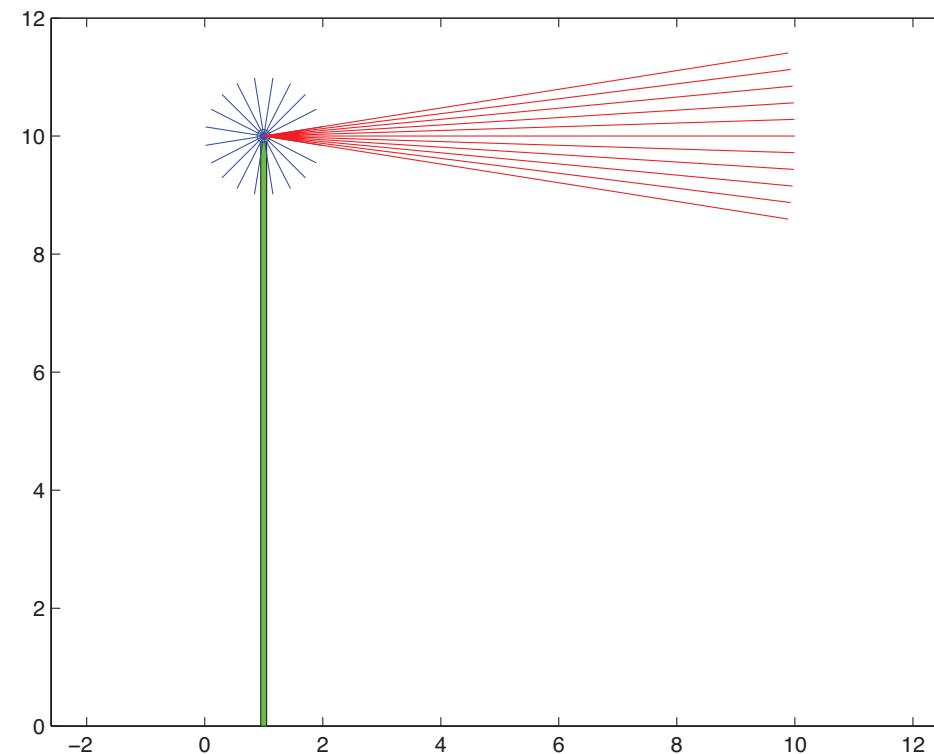
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Lorsque l'on est très loin de la source, 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

Absorption

Ombres

Conclusions

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.

# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

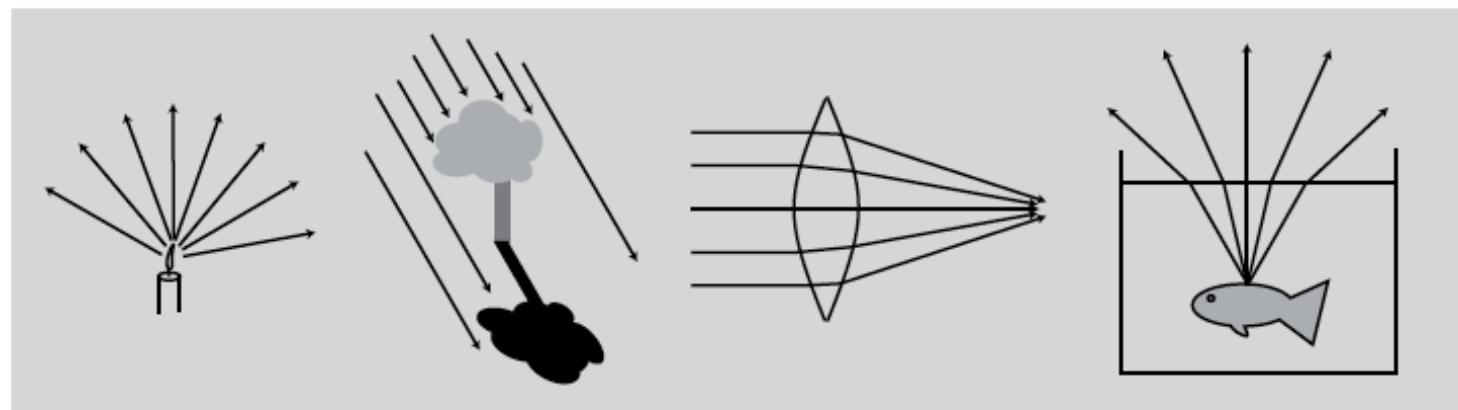
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Comportement des rayons de lumière.



# Propagation de la lumière

## Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

Absorption

Ombres

Conclusions

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.

Ce sont ces modèles que nous avons présentés au chapitre 7 et qui se révèleront aussi très utiles dans des situations où la réflexion et la transmission ne sont pas parfaites.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Analyse de la réflexion

- Supposons que l'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

Absorption

Ombres

Conclusions

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  $\vec{j}$  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

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

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

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

# Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

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

# Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- Si  $n_i < n_t$  toutes les valeurs de  $\theta_i$  sont permises ( $-\pi/2 \leq \theta_i \leq \pi/2$ ), et elles généreront un ensemble restreint de valeurs pour  $\theta_t$  ( $-|\arcsin(n_i/n_t)| \leq \theta_t \leq |\arcsin(n_i/n_t)|$ ).
- Si  $n_i > n_t$  les seules valeurs de  $\theta_i$  permises sont  $-|\arcsin(n_t/n_i)| \leq \theta_i \leq |\arcsin(n_t/n_i)|$ . Elles généreront un ensemble complet de valeurs pour  $\theta_t$  ( $0 \leq \theta_t \leq \pi/2$ ) et aucun rayon de lumière ne peut pénétrer dans le second milieu pour  $\theta_i < -|\arcsin(n_t/n_i)|$  ou  $\theta_i > |\arcsin(n_t/n_i)|$  (réflexion totale interne).

# Réflexion et réfraction

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Exemple de réfraction : le pinceau dans le bocal.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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).

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## La réflexion

Deux options existent :

- méthode des images virtuelles ;
- méthode des rayons.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Méthode des images virtuelles

- Fonctionne très bien pour un seul miroir plan ou pour un ensemble de miroirs plans à angles droits.
- Beaucoup plus compliqués pour des miroirs plans avec angles variés.
- Fonctionne pour un miroir courbe, mais plus compliqué.
- Très compliqué pour combinaison de miroirs courbes et plans.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Principe pour un miroir plan :

- on suppose premièrement que le miroir a une extension infinie (un point du miroir est identifié par  $\vec{r}_m$ ) ;
- pour chacun des points de l'objet  $\vec{r}$ , on trace une ligne droite entre l'objet et le miroir qui est normale au miroir (direction  $-\vec{i}$ ) ;
- cette ligne a une longueur  $d = (\vec{r} - \vec{r}_m) \cdot \vec{i}$  ;
- on continue cette ligne de l'autre côté du miroir une distance  $d$  supplémentaire ;
- le point trouvé

$$\vec{r}_{\text{image}} = \vec{r} - 2d\vec{i}$$

- représente l'image virtuelle du point de départ dans le miroir ;
- on répète pour tous les points de l'image.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

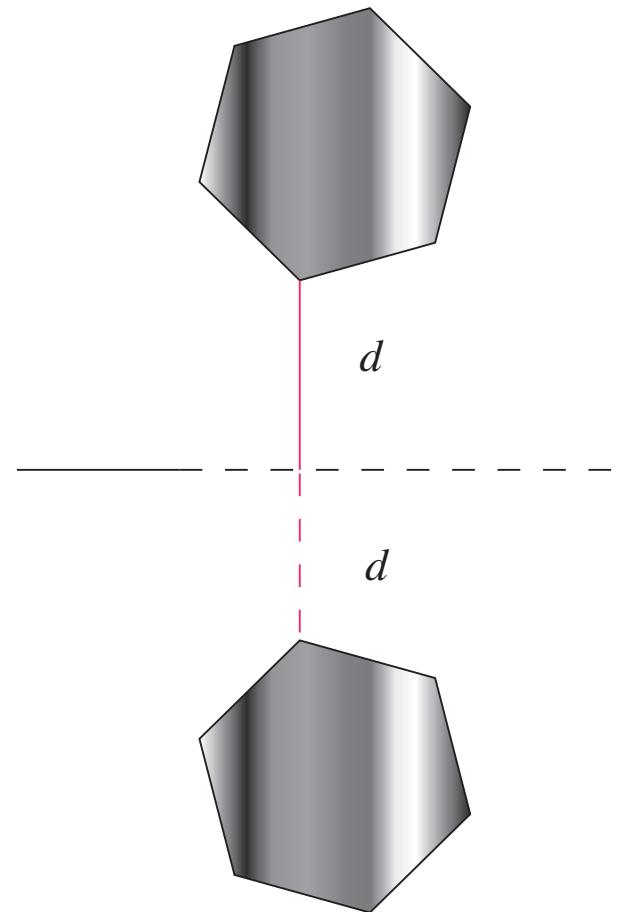
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Images virtuelles dans un miroir plan.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

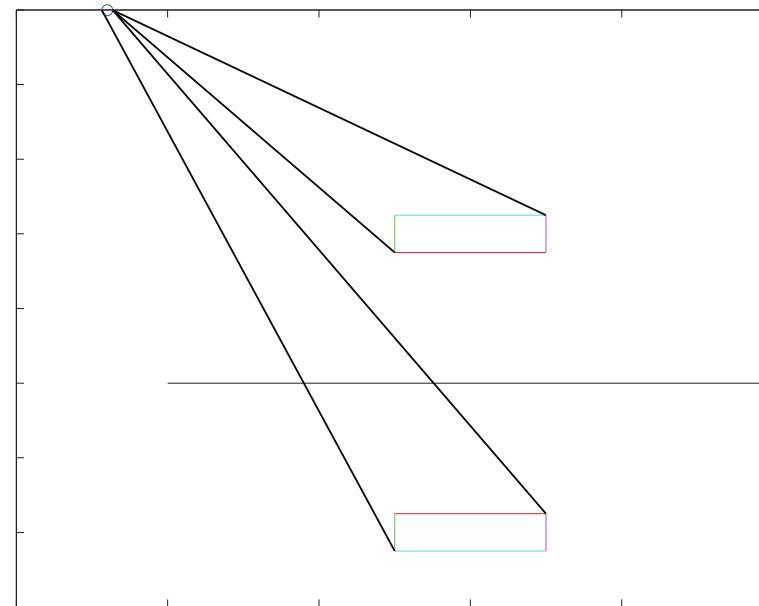
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Pour reconstruire l'image vue par l'observateur, on a qu'à tracer les lignes possibles entre l'oeil, l'objet et ses images virtuelles (en passant par le miroir).



Ceci est relativement facile pour un seul miroir plan, car on connaît la position de l'objet et de son image dans l'espace.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Principe pour deux miroirs plans :

- on suppose premièrement que les miroirs ont une extension infinie ;
- pour chacun des points de l'objet, on trace une ligne entre l'objet et chaque miroir qui est normale au miroir, cette ligne ayant une longueur  $d_i$  ;
- on continue ces lignes de l'autre côté des miroirs une distance  $d_i$  supplémentaire ;
- ces points représenteront l'image virtuelle du point de départ pour chaque miroir ;
- on répète pour tous les points de l'image ;

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- on répète ensuite le processus pour chaque image virtuelle ;
- pour deux miroirs perpendiculaires, on génère 3 images virtuelles ;
- pour trois miroirs tous perpendiculaires entre eux, on génère 7 images virtuelles ;
- dans les cas où les miroirs ne sont pas perpendiculaires entre eux, on peut se retrouver avec un nombre infini d'images.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

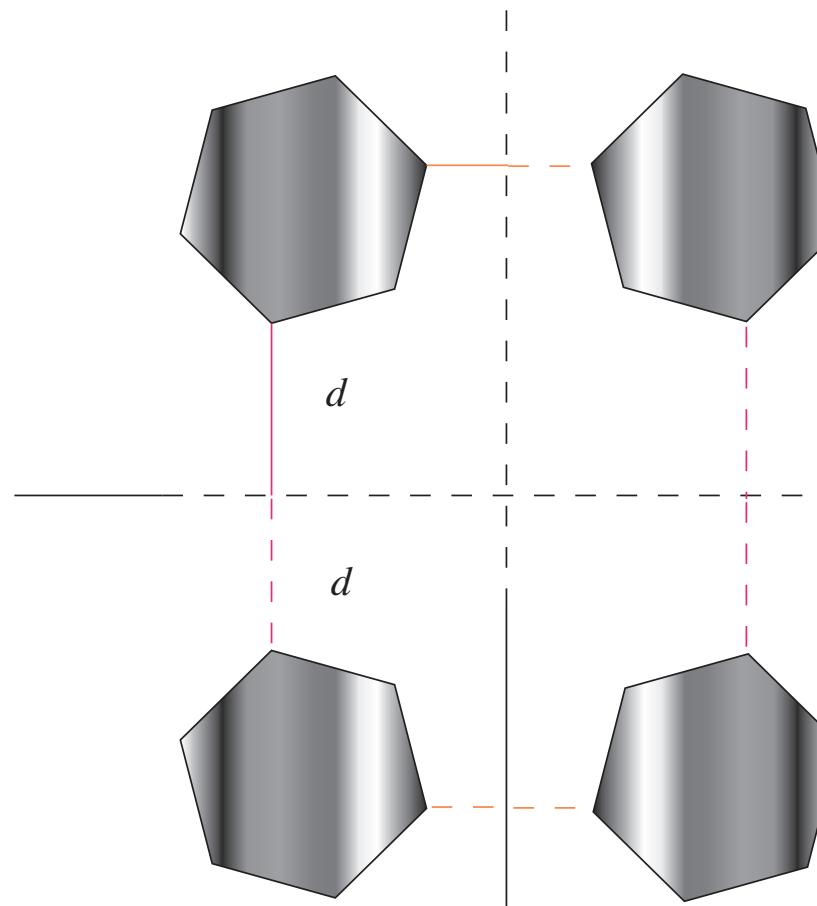
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Images virtuelles pour deux miroirs plans perpendiculaires.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

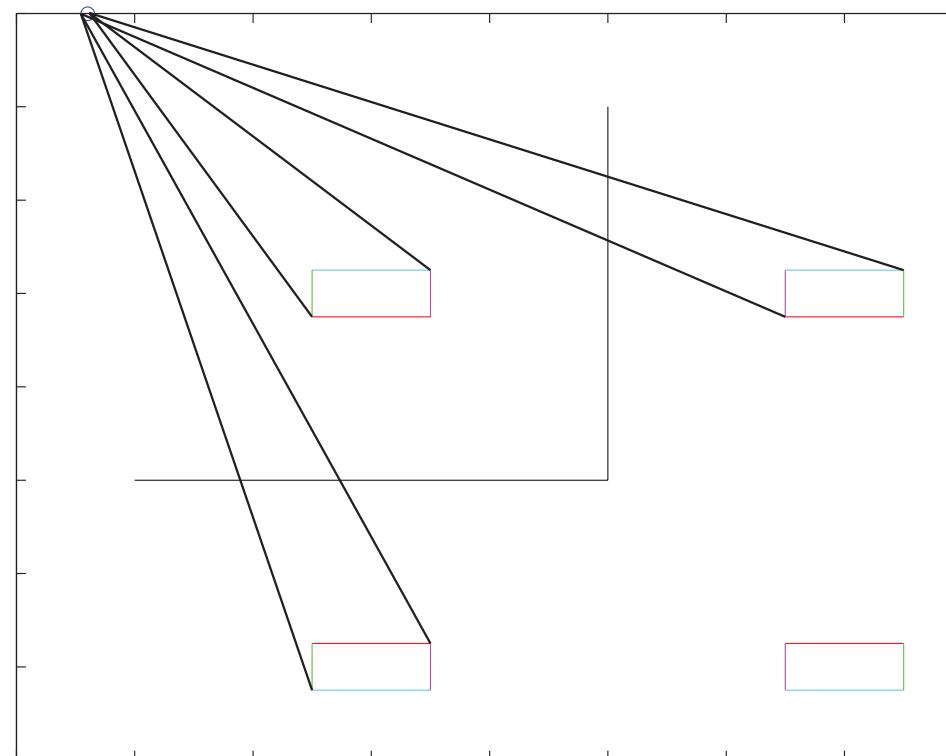
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Pour reconstruire l'image vue par l'observateur, on a qu'à tracer les lignes possibles entre l'oeil, l'objet et ses images virtuelles.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

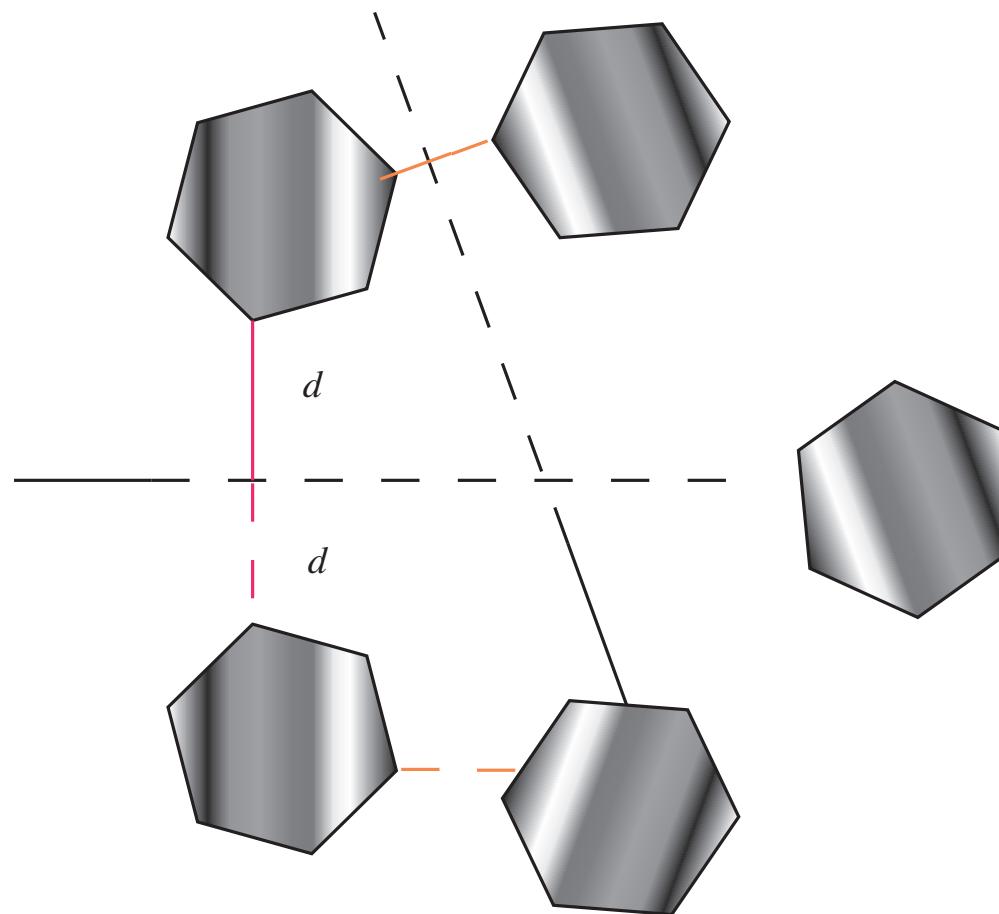
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Quelques images virtuelles dans deux miroirs plans à angle arbitraire.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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.
- 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

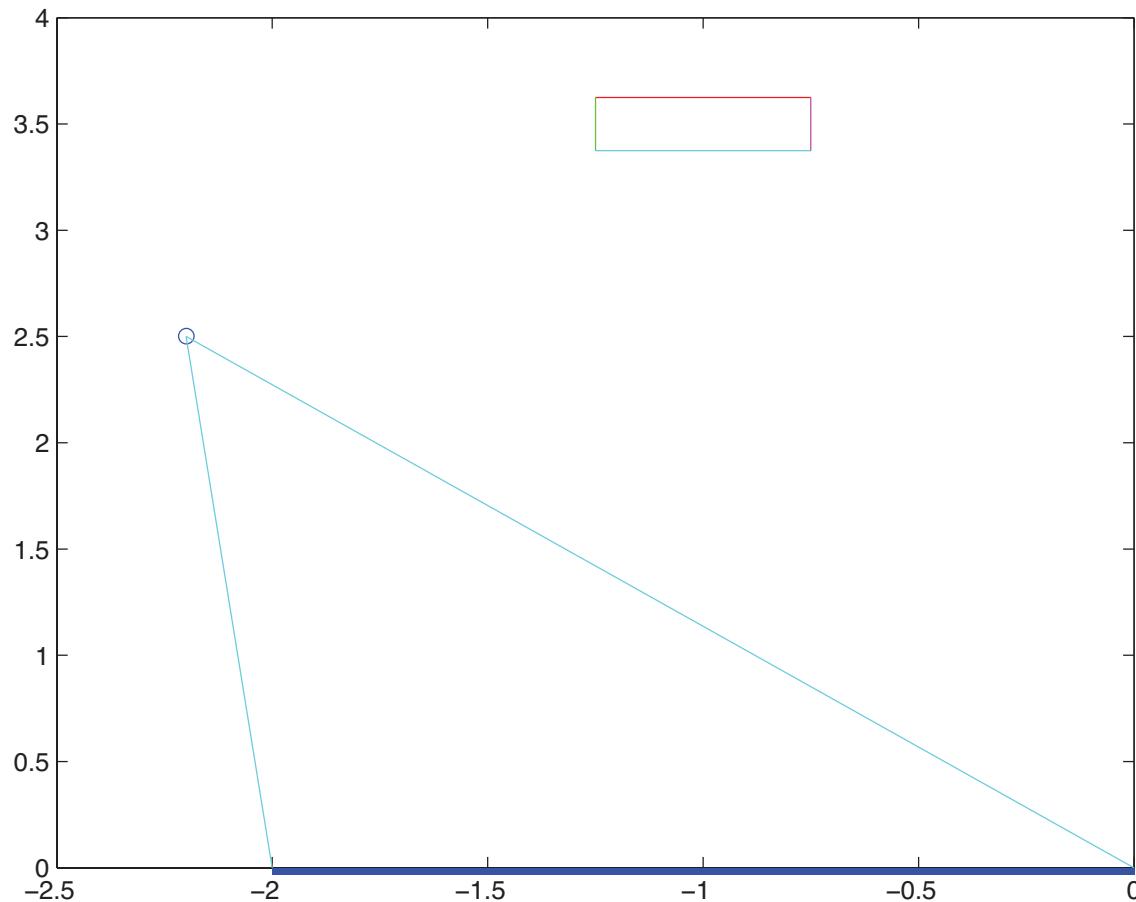
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

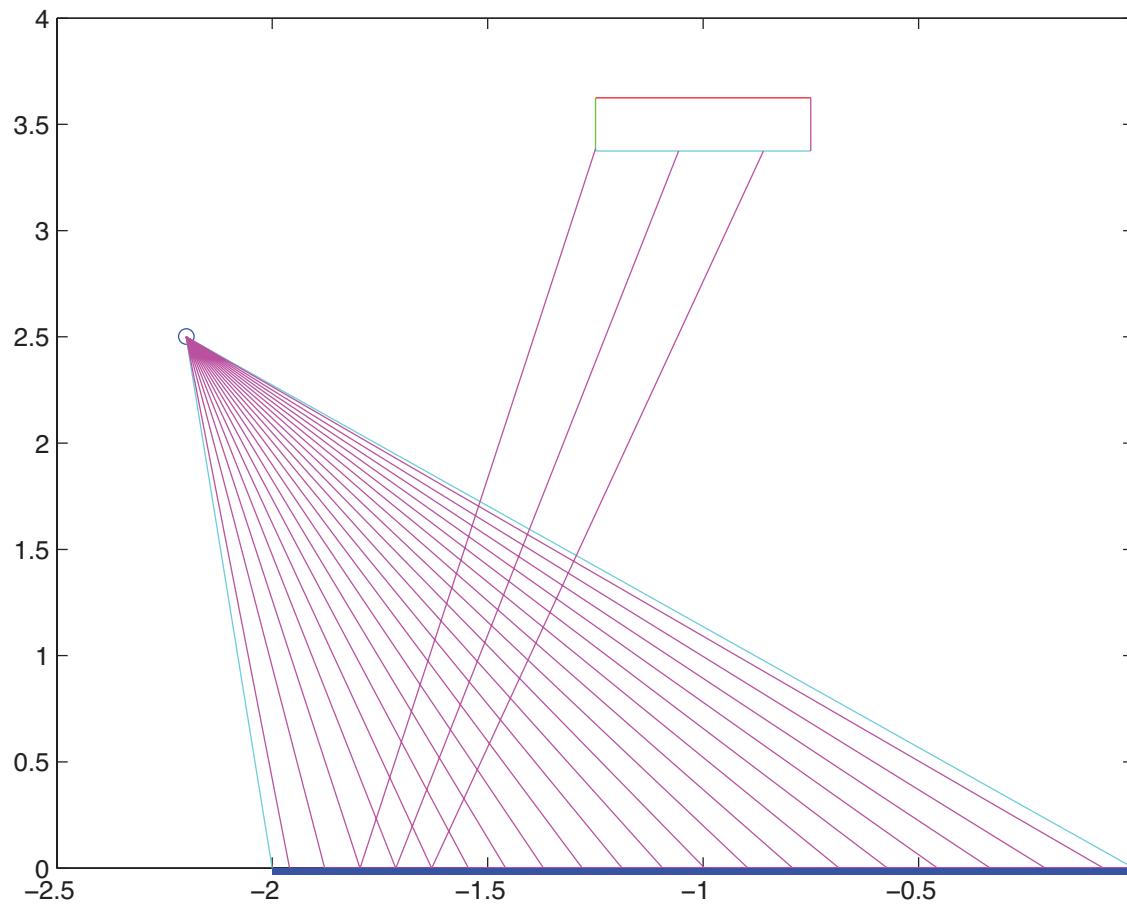
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

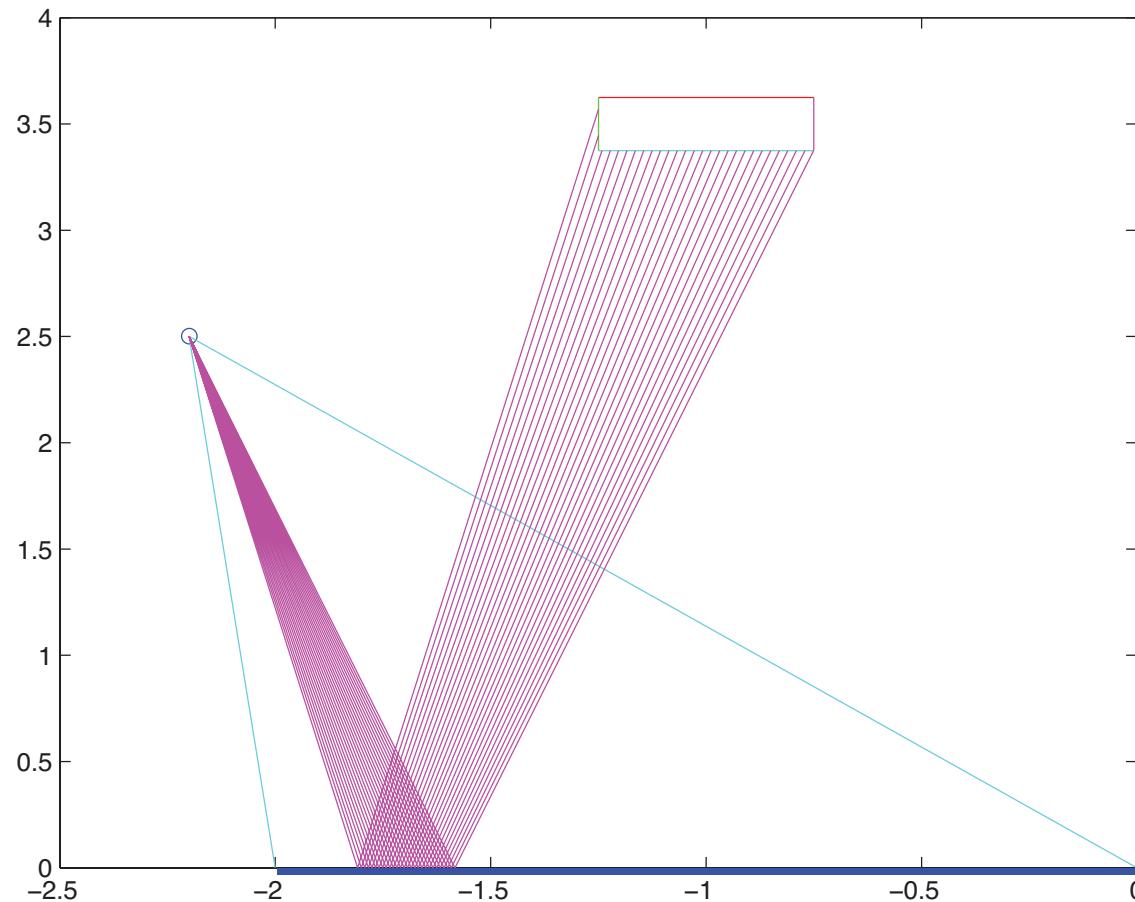
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

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

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

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

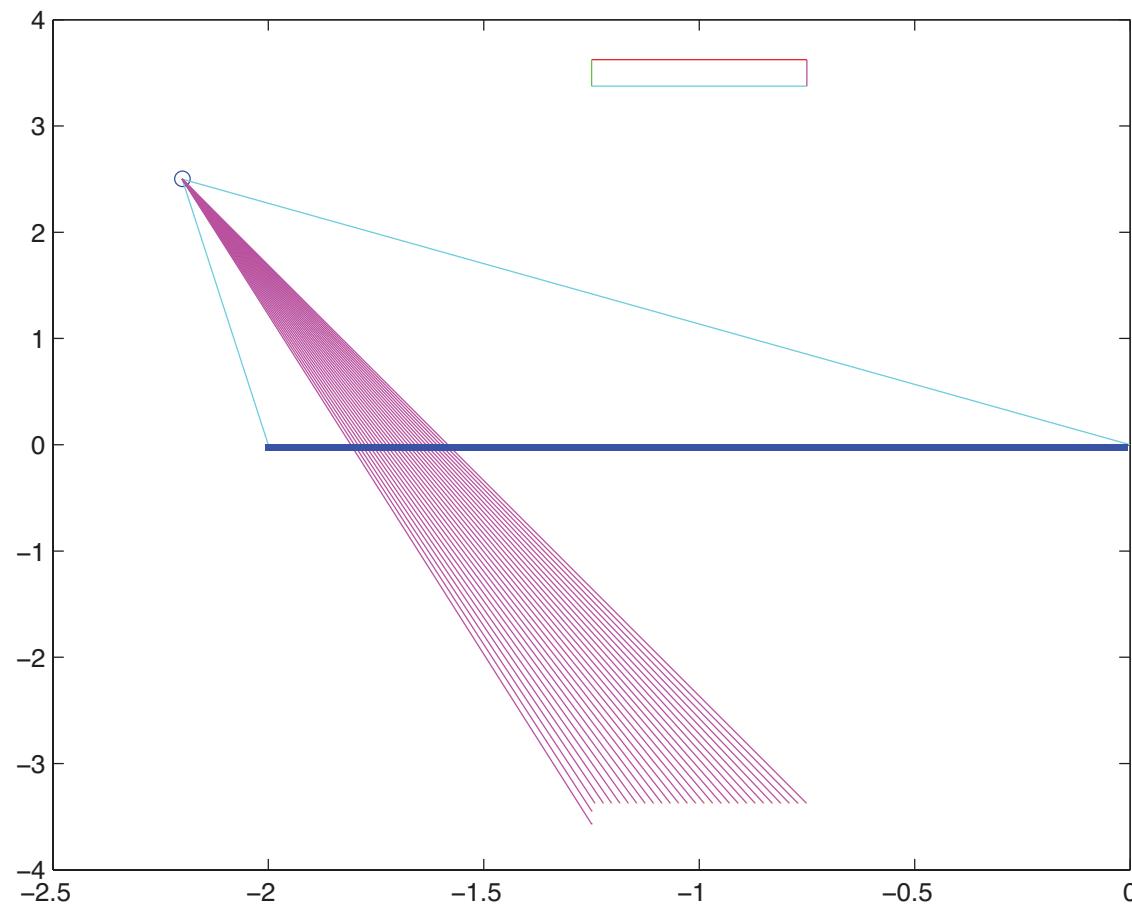
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

## Méthode des rayons et réfraction

- 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

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

Absorption

Ombres

Conclusions

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

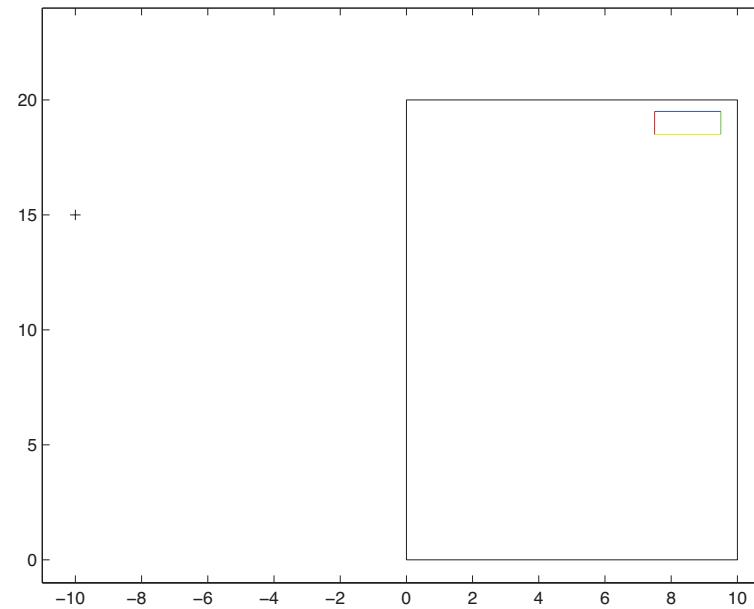
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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 +.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

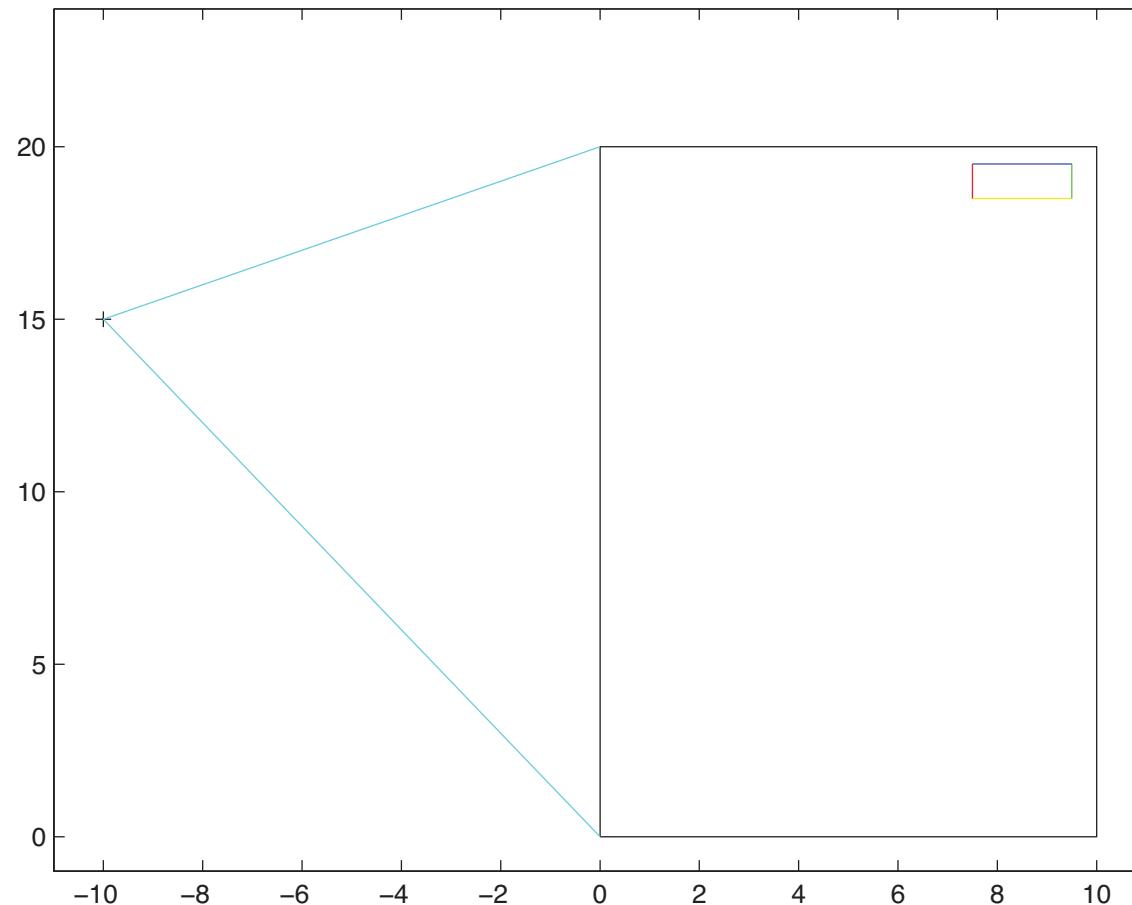
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

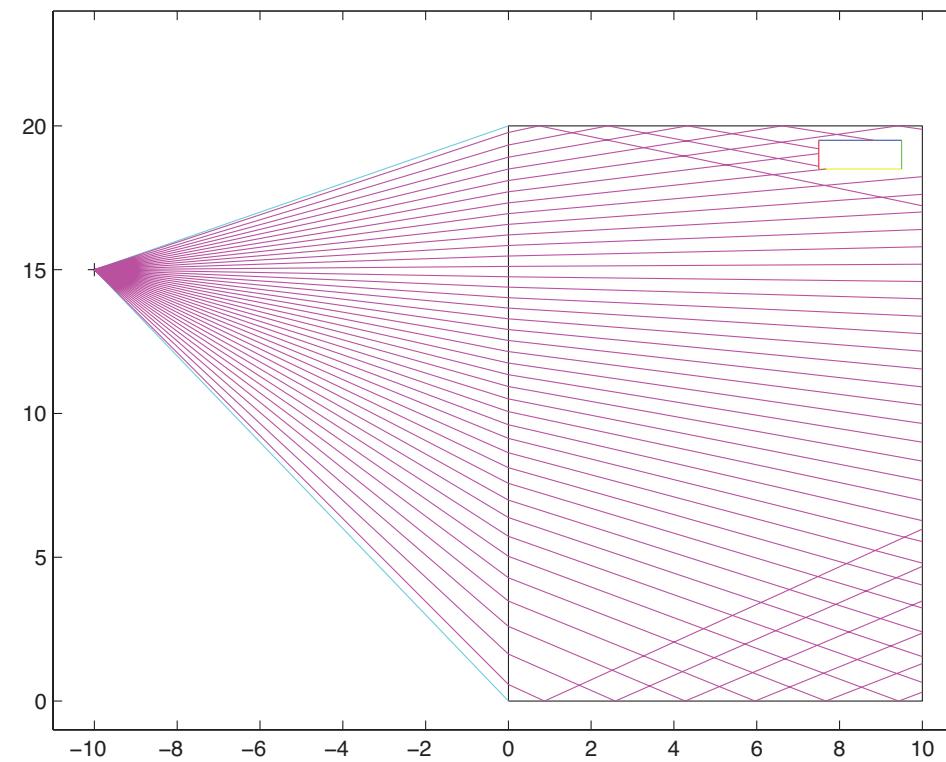
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

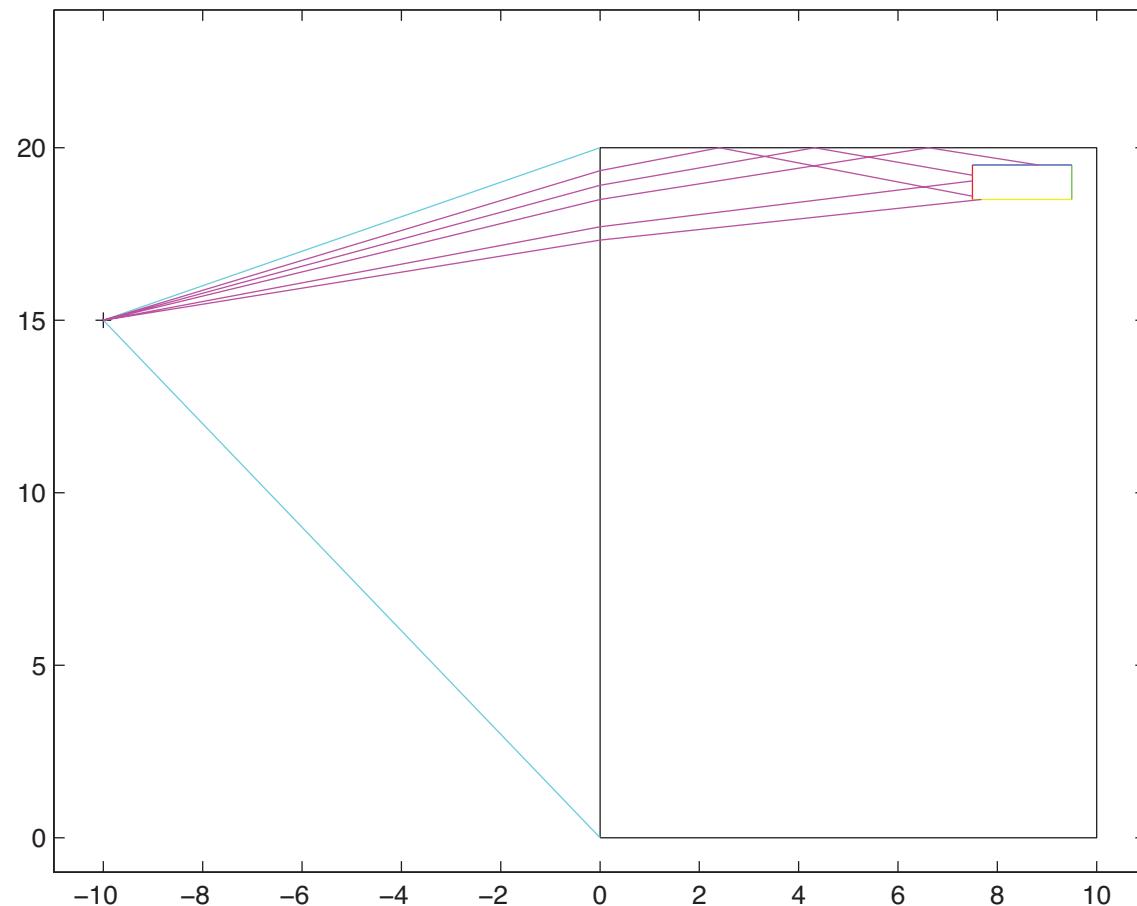
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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.

# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

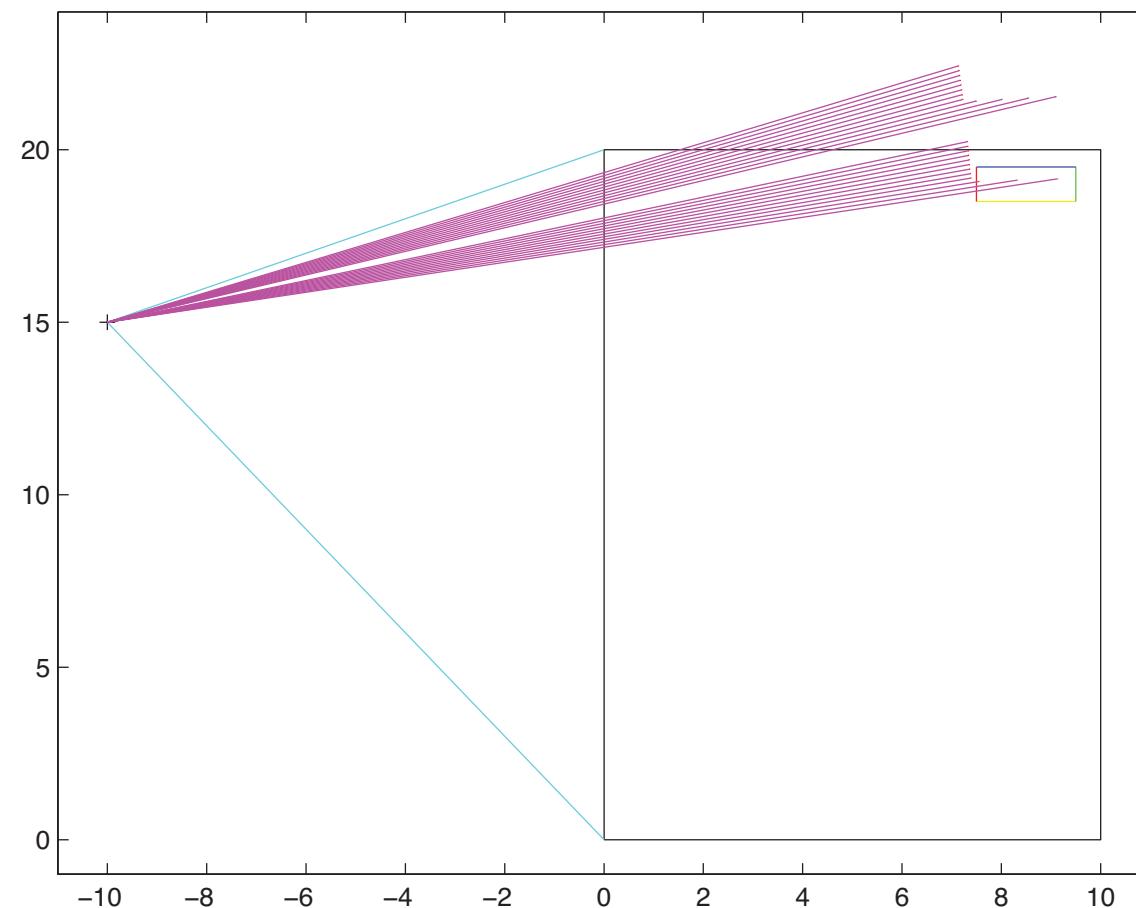
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

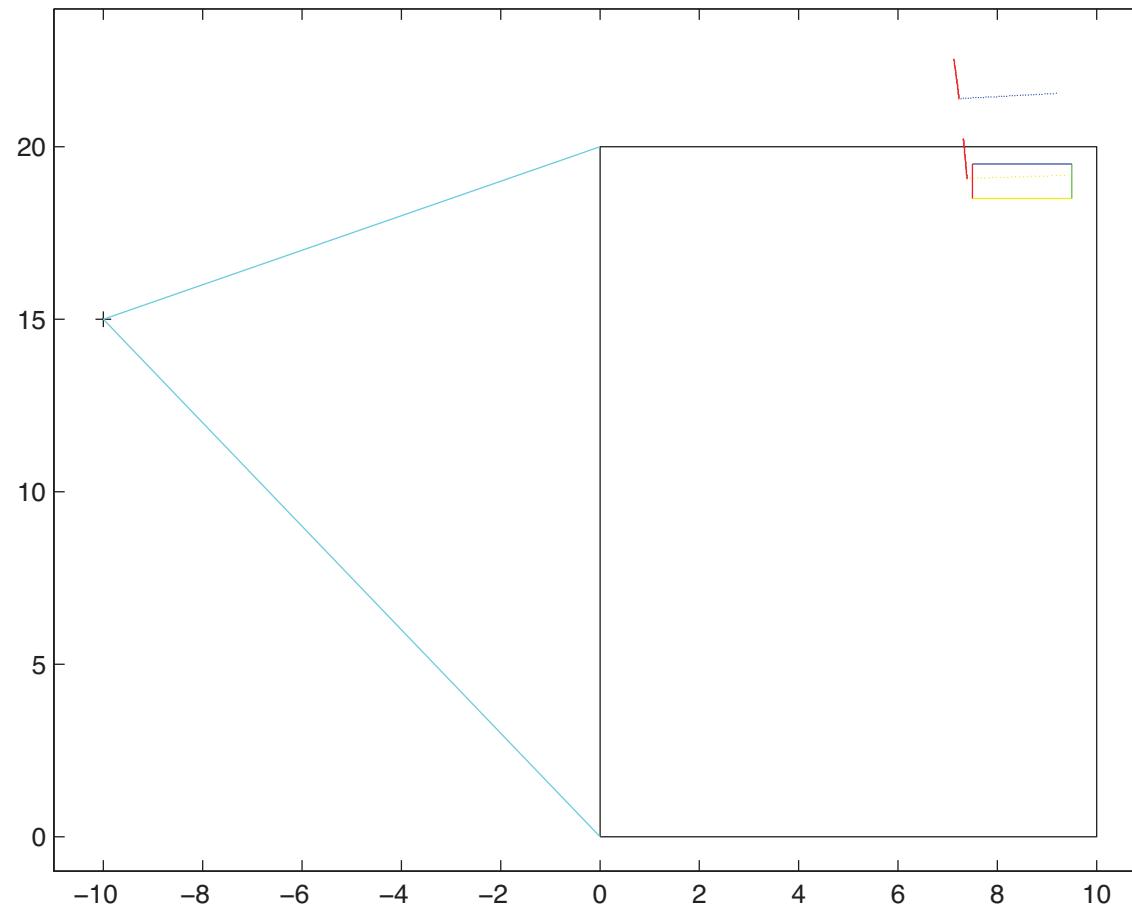
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

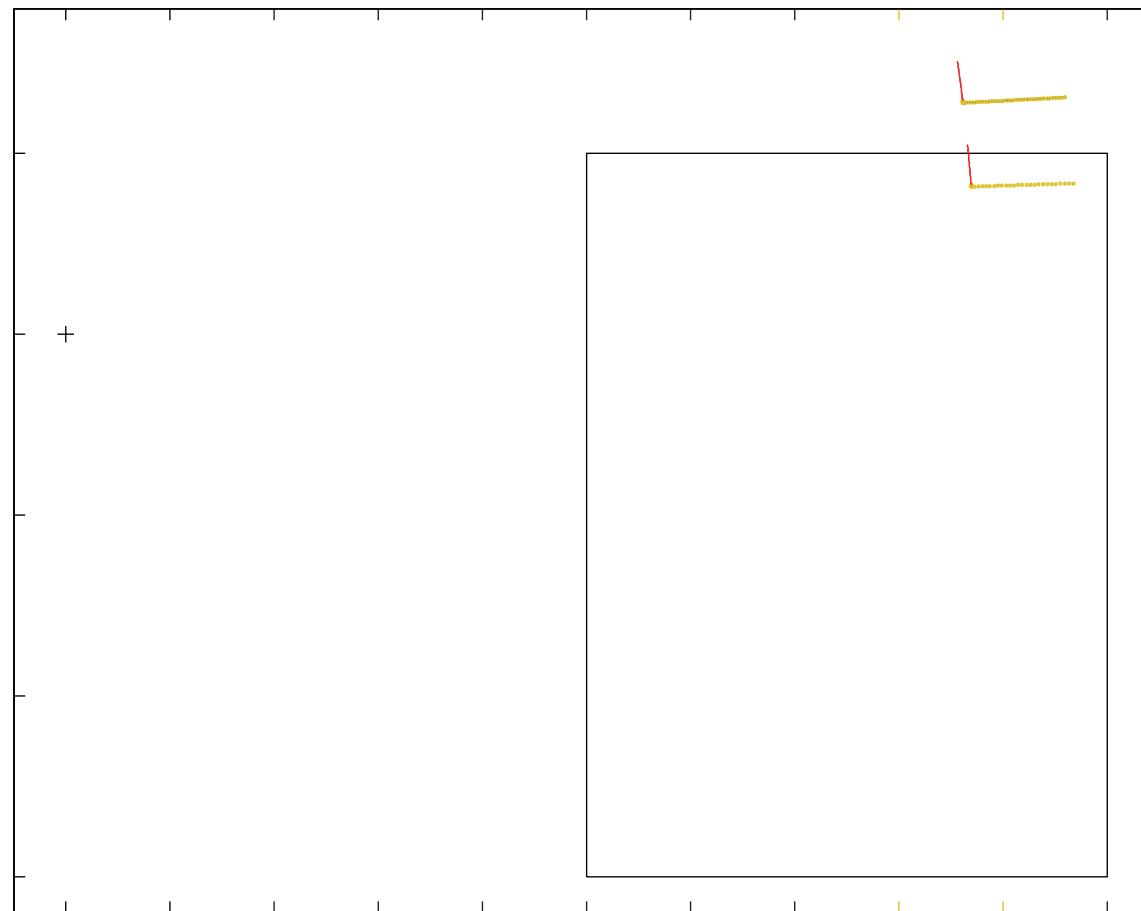
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

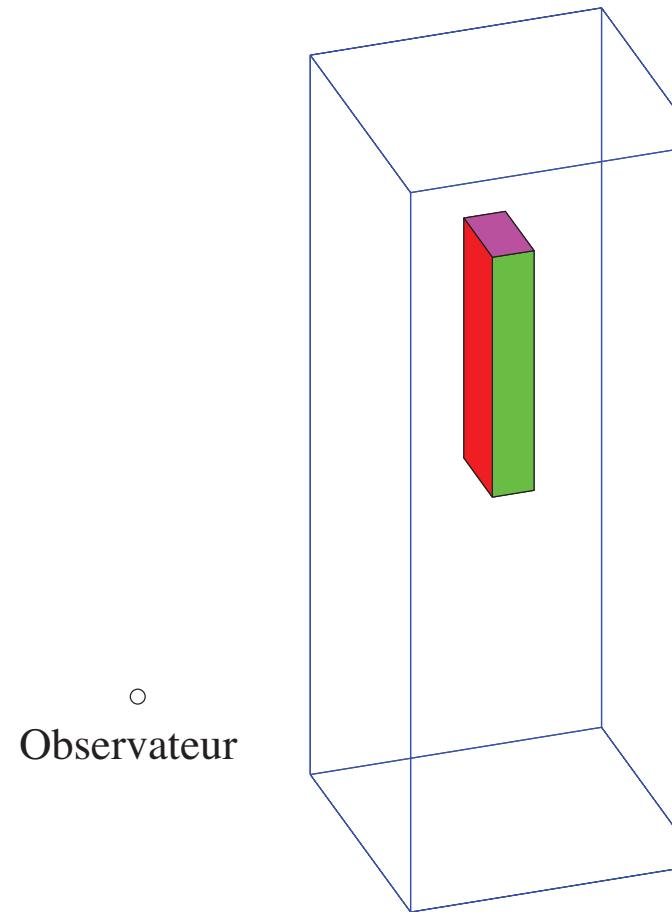
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Exemple 3D.



# Reconstitution d'images

Description de la  
lumière

Réflexion et réfraction

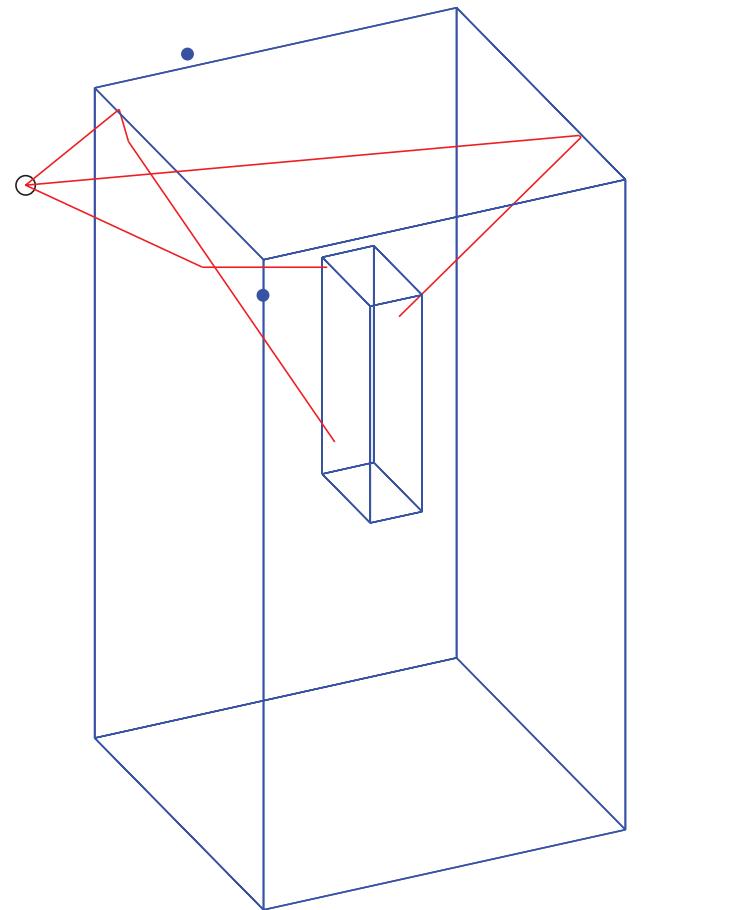
Réflexion diffuse et  
absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Quelques lignes en 3D.



# Reconstitution d'images

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

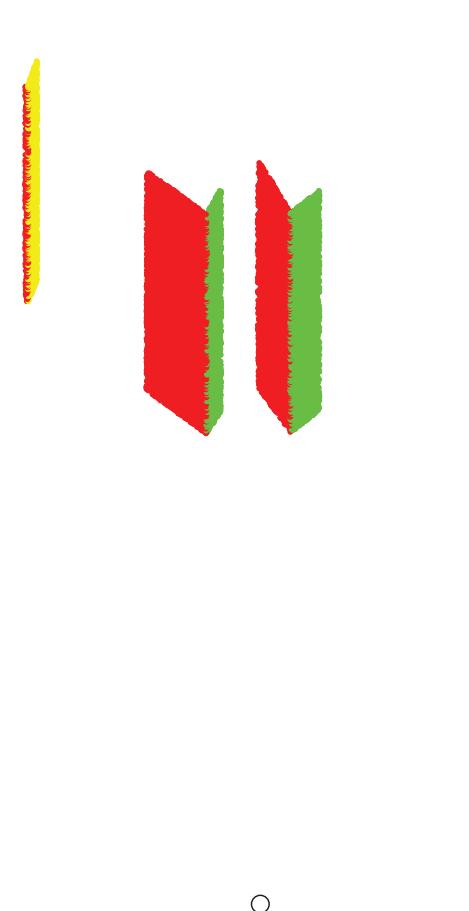
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Image reconstruite en 3D



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

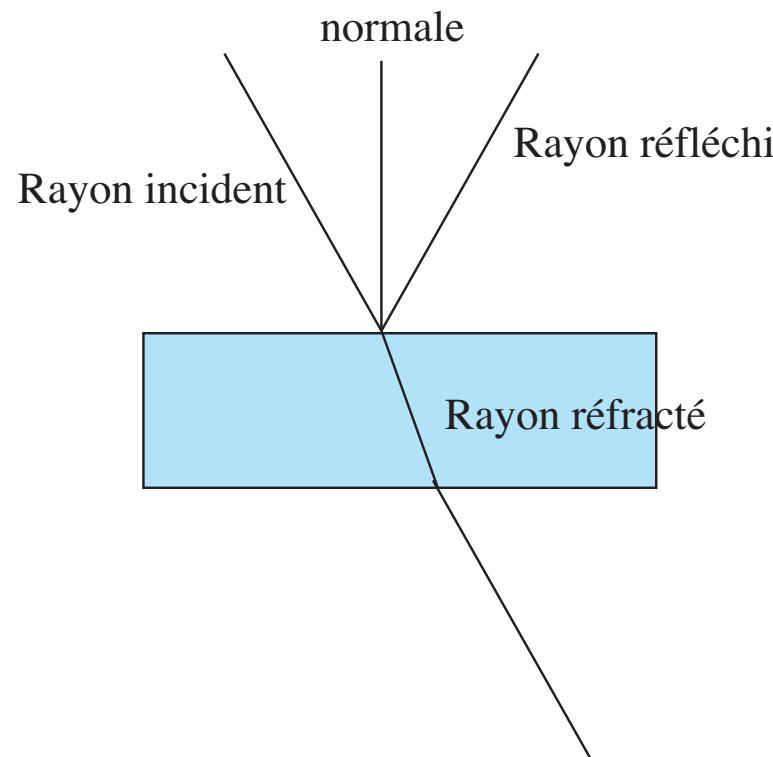
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Réflexion et réfraction par une surface parfaite.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

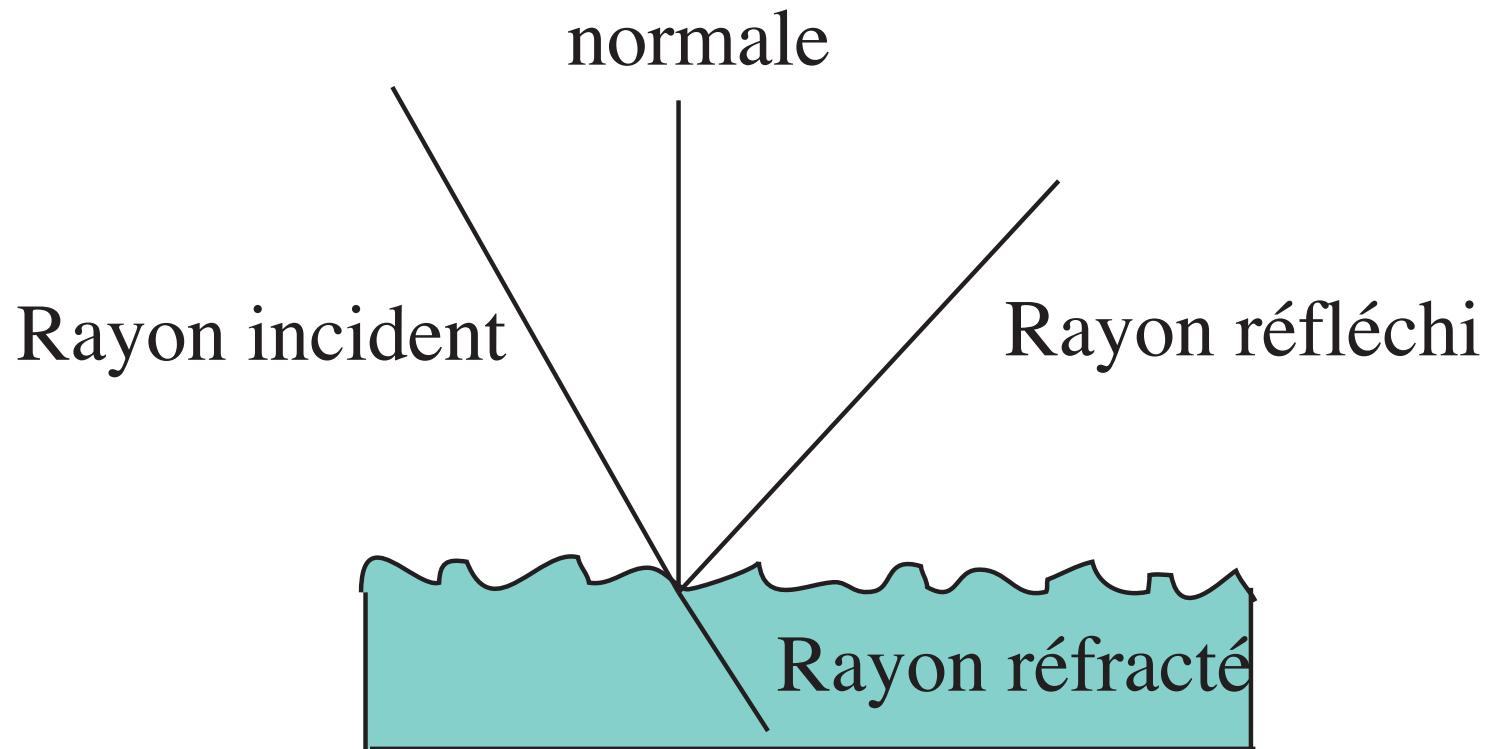
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Réflexion et réfraction par une surface imparfaite.



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

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

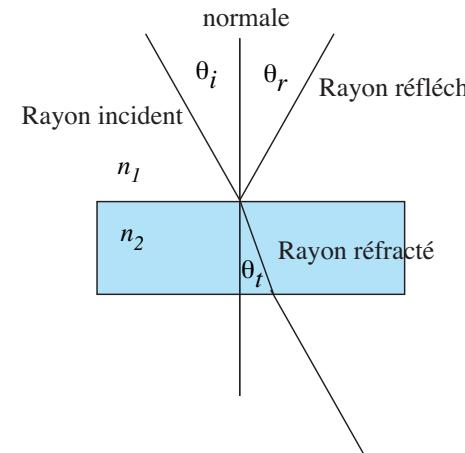
Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

Absorption

Ombres

Conclusions

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

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

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

$$\vec{\mathcal{H}} = \frac{1}{i\omega\mu} (\vec{k} \times \vec{\mathcal{E}}) = \mathcal{H} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \hat{h}$$

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

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

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

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

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

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

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

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

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

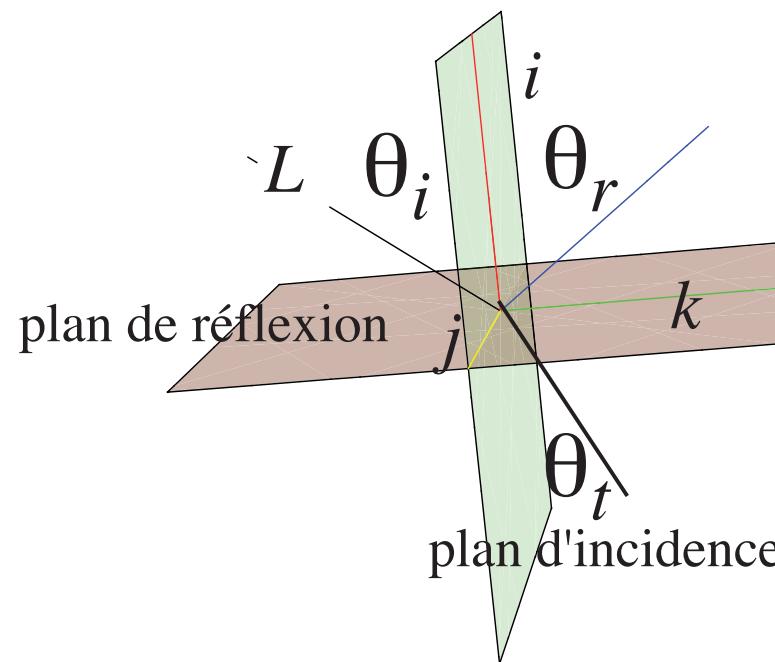
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Notation.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

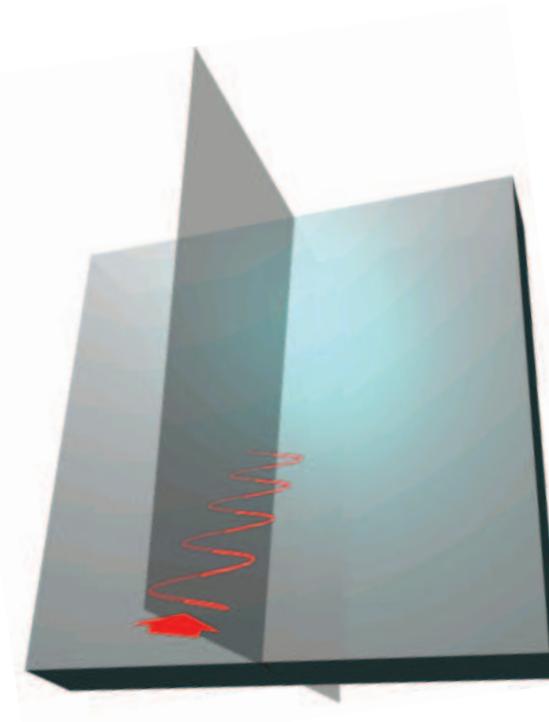
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

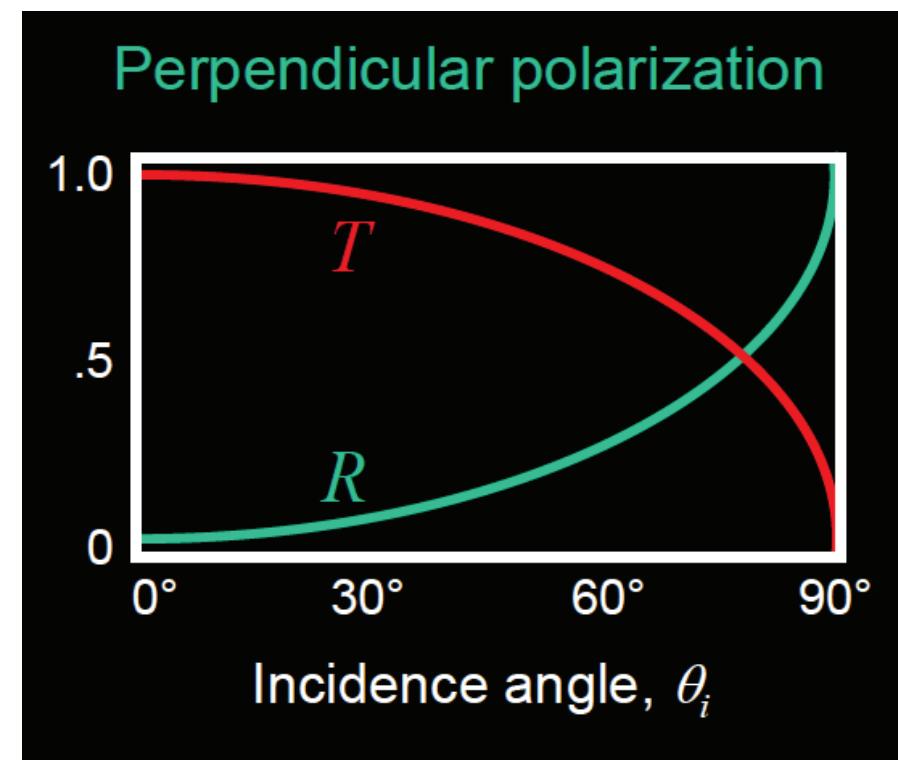
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

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

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

- 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

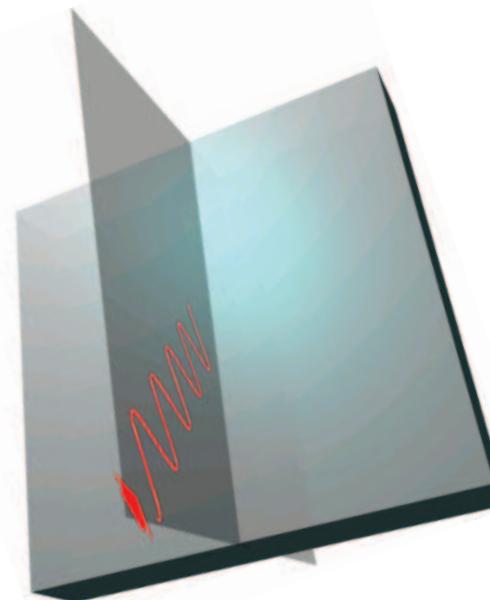
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

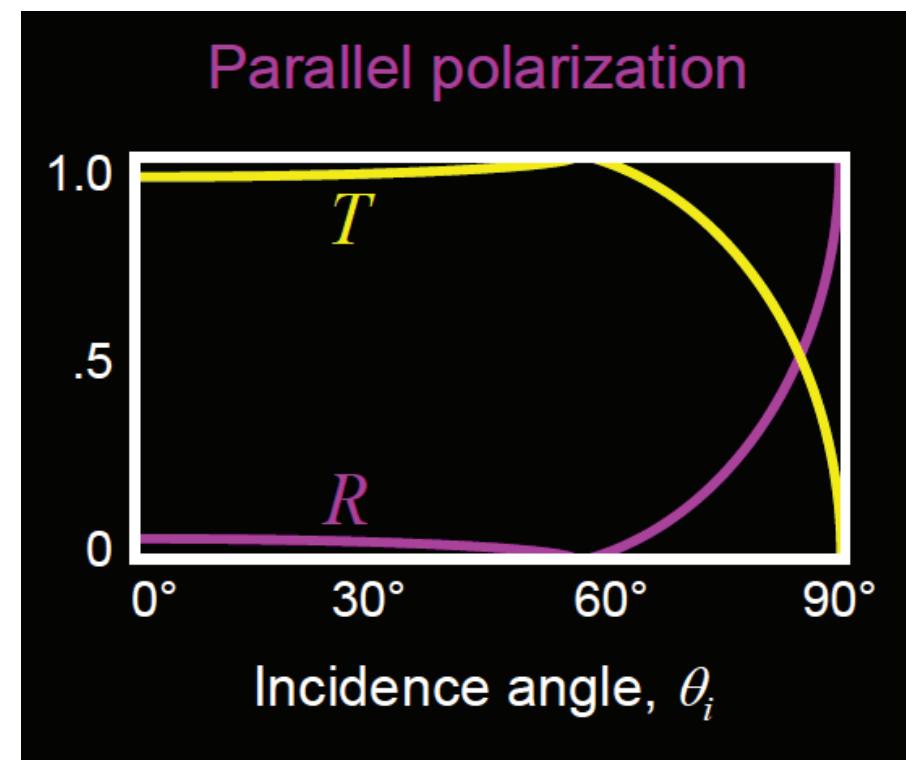
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

Coefficients de réflexion et de transmission pour les ondes TE à l'interface air-verre pour un angle d'incidence  $\theta_i = 0$  (indépendant de la polarisation).

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

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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)

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

$$T = 1 - R$$

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

$$I_r = I_i R$$

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

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

Absorption

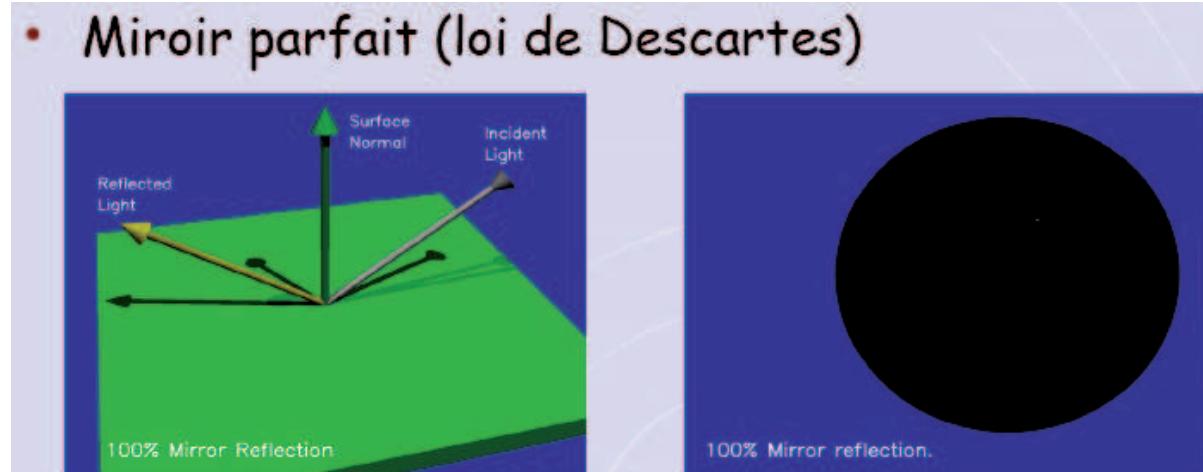
Ombres

Conclusions

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.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

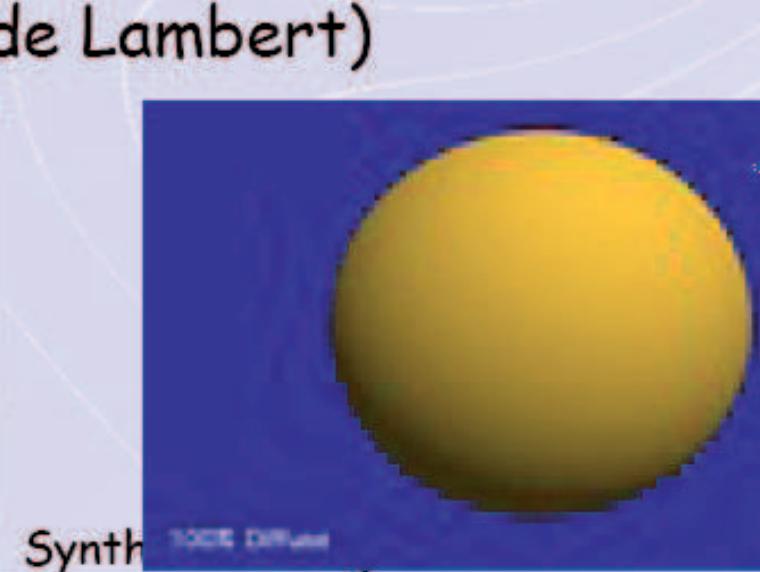
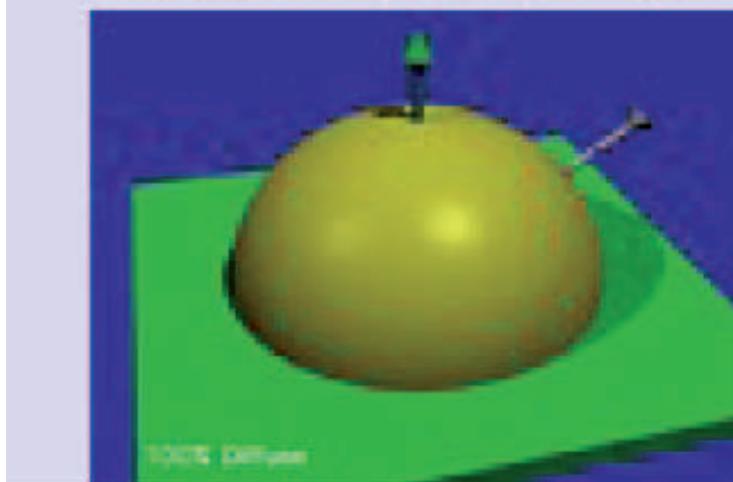
Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de Lambert.

- Diffusion totale (loi de Lambert)



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

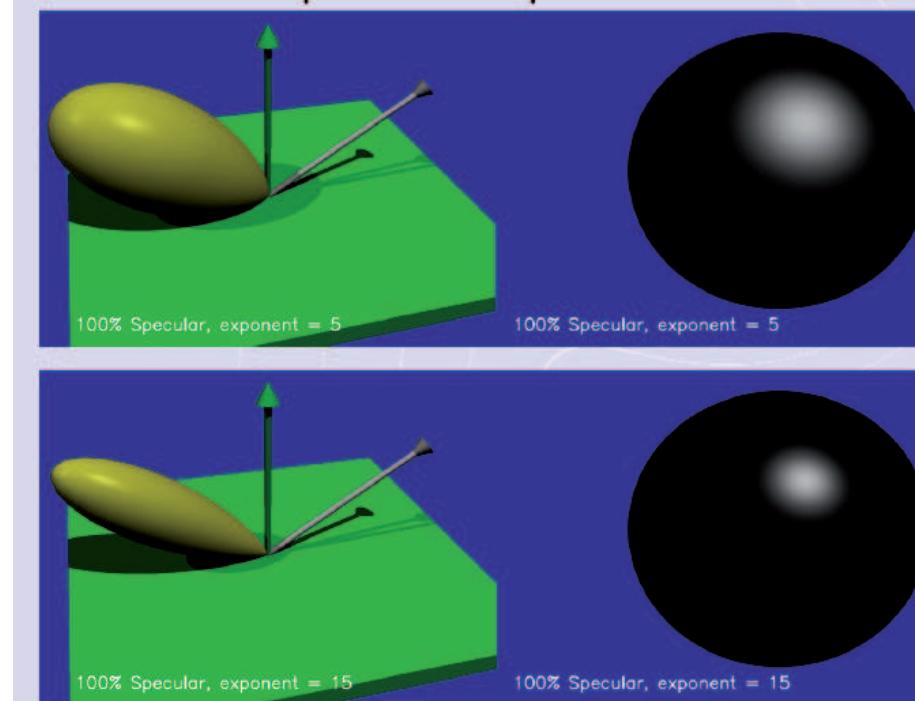
Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de réflexion imparfaite.

### • Réflecteur spéculaire imparfait



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

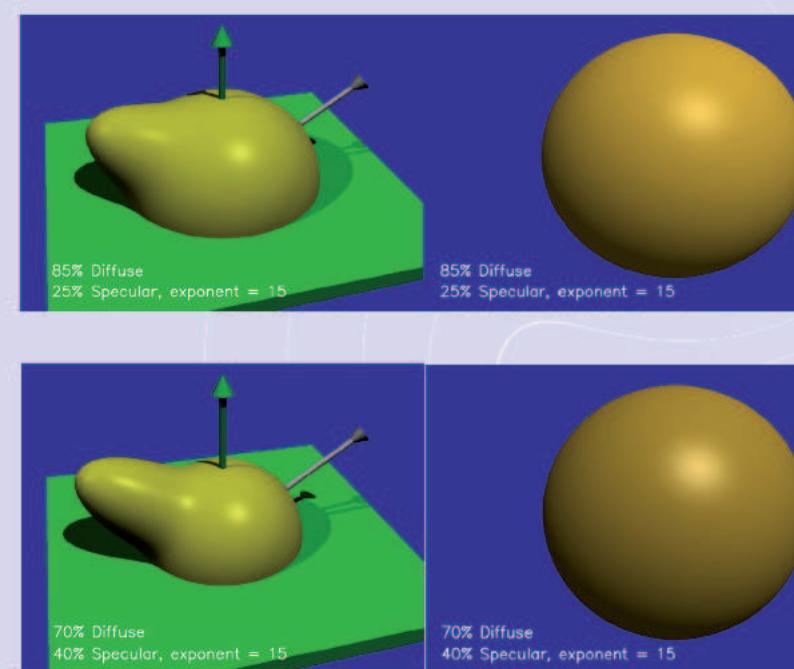
Absorption

Ombres

Conclusions

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

- Spécularité et diffusion



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

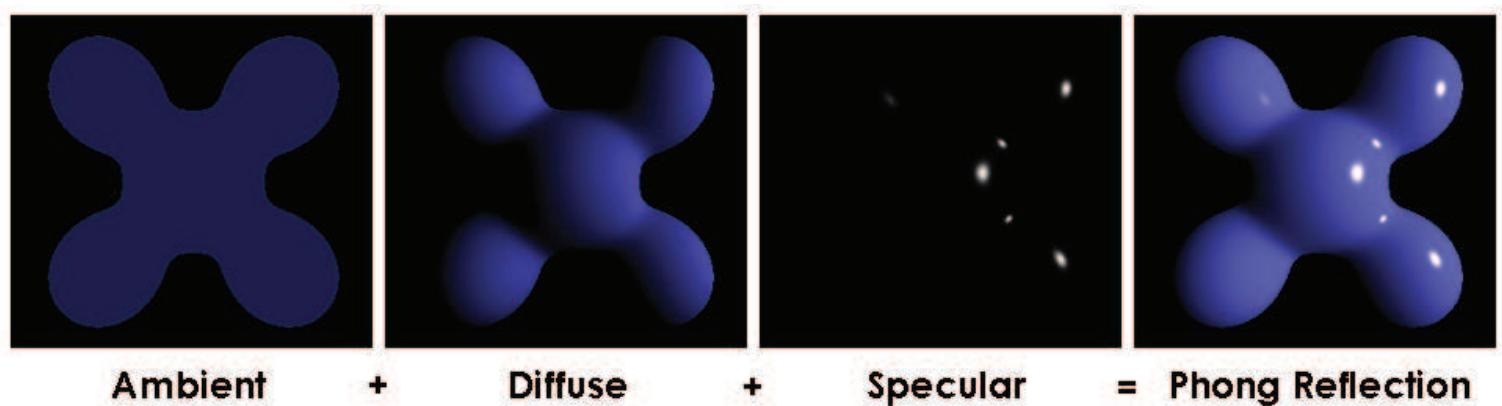
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de Phong.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

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

Absorption

Ombres

Conclusions

- $I_i$  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

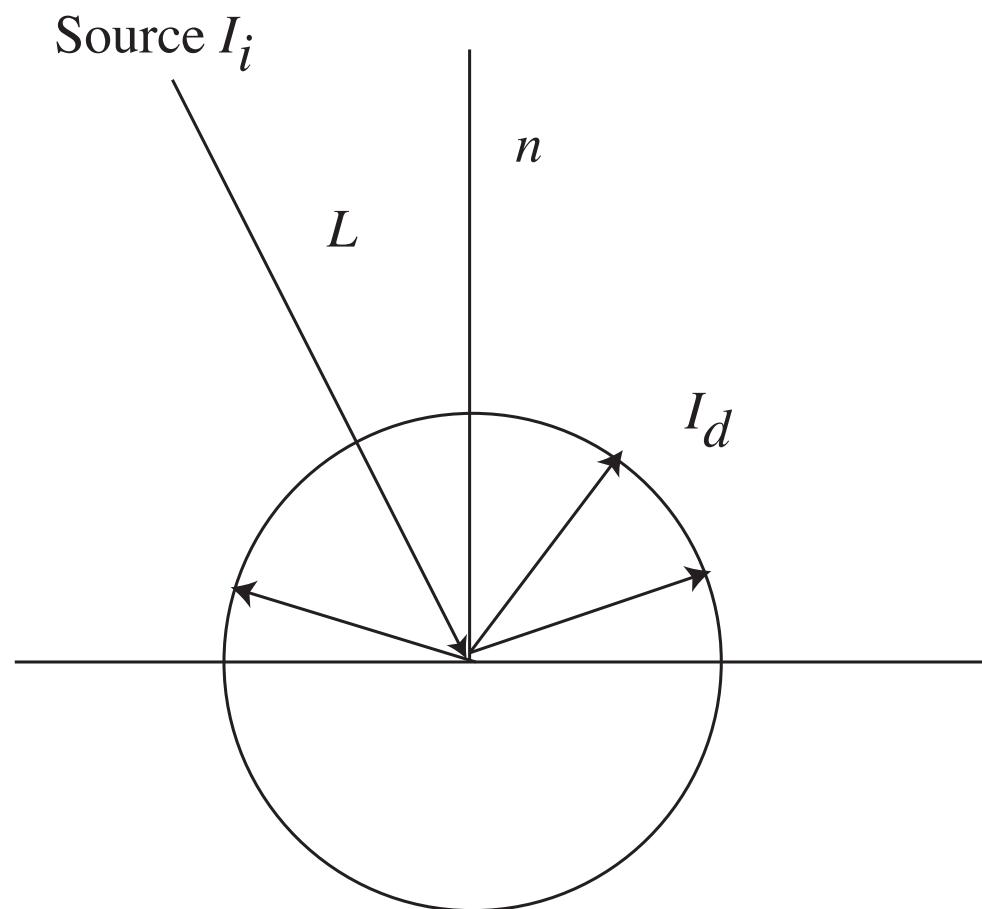
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Réflexion diffuse



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

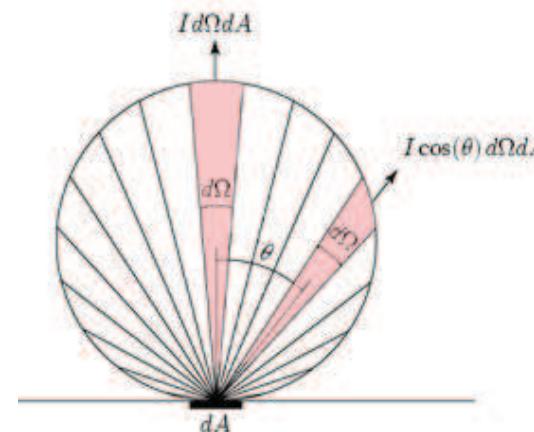
Ombres

Conclusions

## Justification :

- nombre de photons émis dans un cône d'angle solide  $d\Omega$  à partir d'une source distribuée sur une surface  $dA$  (loi de Lambert)

$$N_e \propto I(\vec{n} \cdot \vec{L})d\Omega dA = I \cos(\theta) d\Omega dA$$



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- nombre de photons perçus par un observateur à travers une ouverture  $dA_o$  observant une surface  $dA$  à partir d'une direction  $\vec{L}$

$$N_p \propto I(\vec{n} \cdot \vec{L}) d\Omega_o dA_o = I \cos(\theta) d\Omega_o dA_o$$

avec  $d\Omega_o$  l'angle solide que sous-tend la surface  $dA$  pour un observateur situé directement au-dessus de la surface qui émet de la lumière.

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

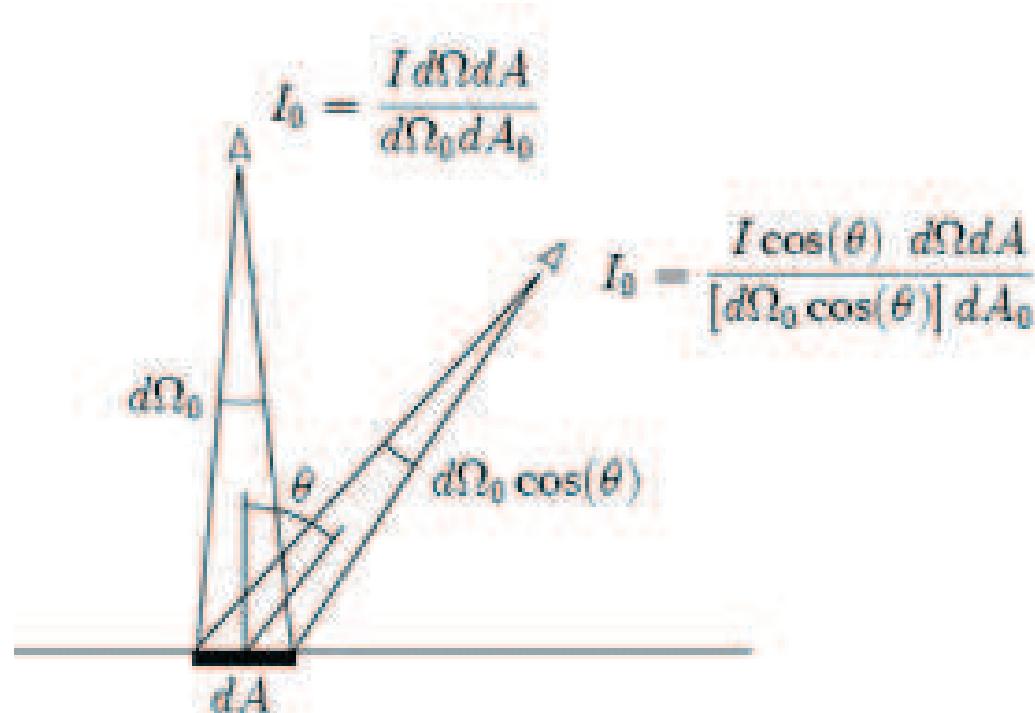
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Nombre de photons perçus à travers une ouverture  $dA_o$ .



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Le rapport entre  $N_e$  et  $N_o$  est donc indépendant de la position angulaire de l'observateur

$$\frac{N_e}{N_p} = \frac{d\Omega_o dA_o}{d\Omega dA}$$

On dit alors que la source à la même luminescence apparente  $I_d$  (en lm/(m<sup>2</sup>sr)), quelle que soit la direction de réflexion.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

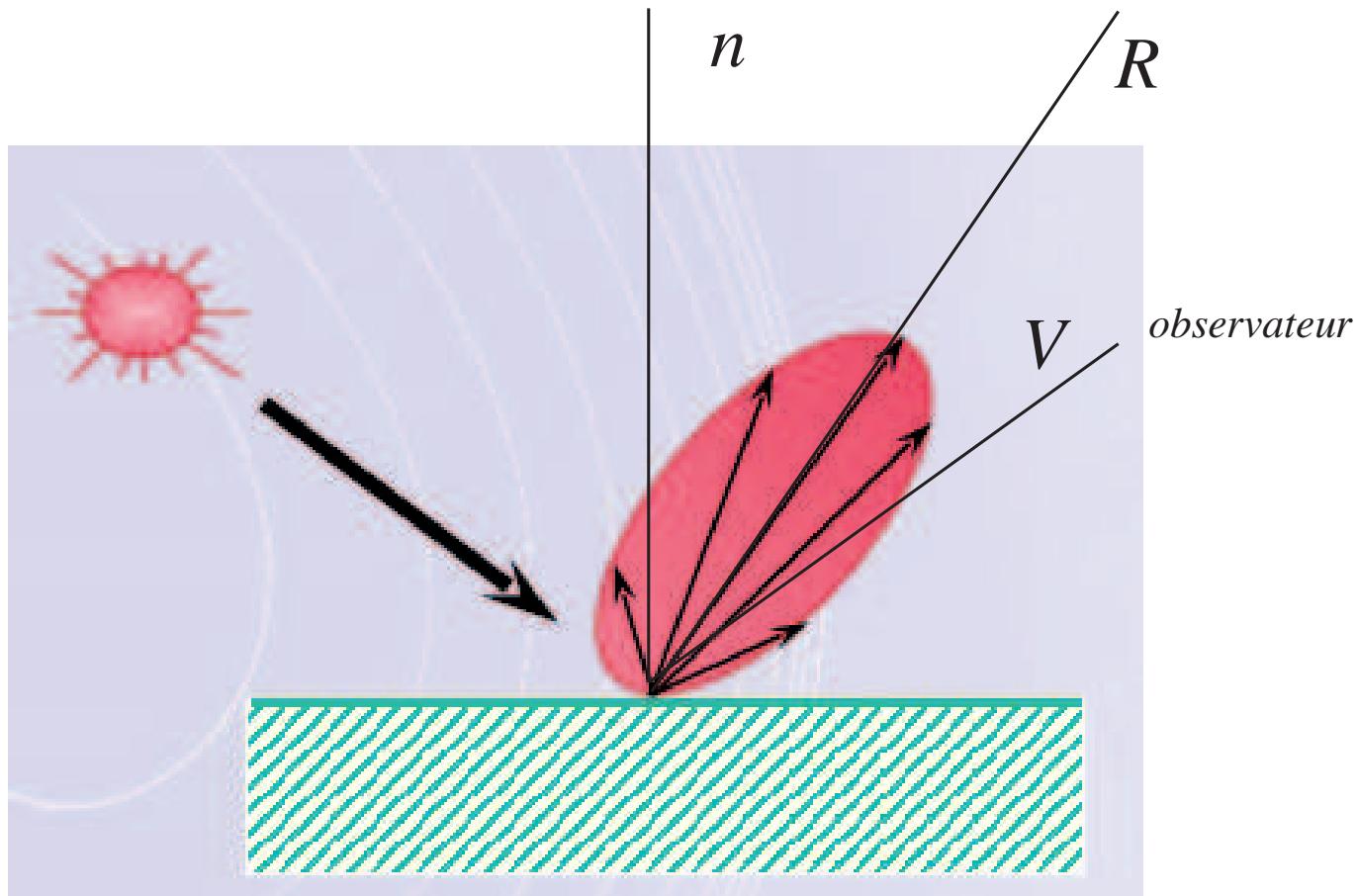
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Réflexion imparfaite



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

Absorption

Ombres

Conclusions

- 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

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

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Observations :

- le modèle de Phong est un modèle de réflexion tridirectionnelle de la lumière

$$I_{\text{RTD}} = f(\vec{L}, \vec{V}, \vec{R}) \\ = k_{\text{ambiante}} I_{\text{ambiante}} + I_i (k_{\text{diffuse}} (\vec{L} \cdot \vec{n}) + k_{\text{si}} (\vec{R} \cdot \vec{V})^m)$$

puisqu'il dépend de la direction de la source  $\vec{L}$ , de l'observateur  $\vec{V}$  et du vecteur  $\vec{R}$  donnant la direction de la lumière réfléchie de façon spéculaire (en plus de dépendre de  $\vec{n}$ , la normale au plan de réflexion) ;

- on connaîtra toujours  $\vec{L}$ ,  $\vec{V}$  et  $\vec{n}$  ;
- le problème majeur consiste cependant à déterminer le vecteur  $\vec{R}$ .

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

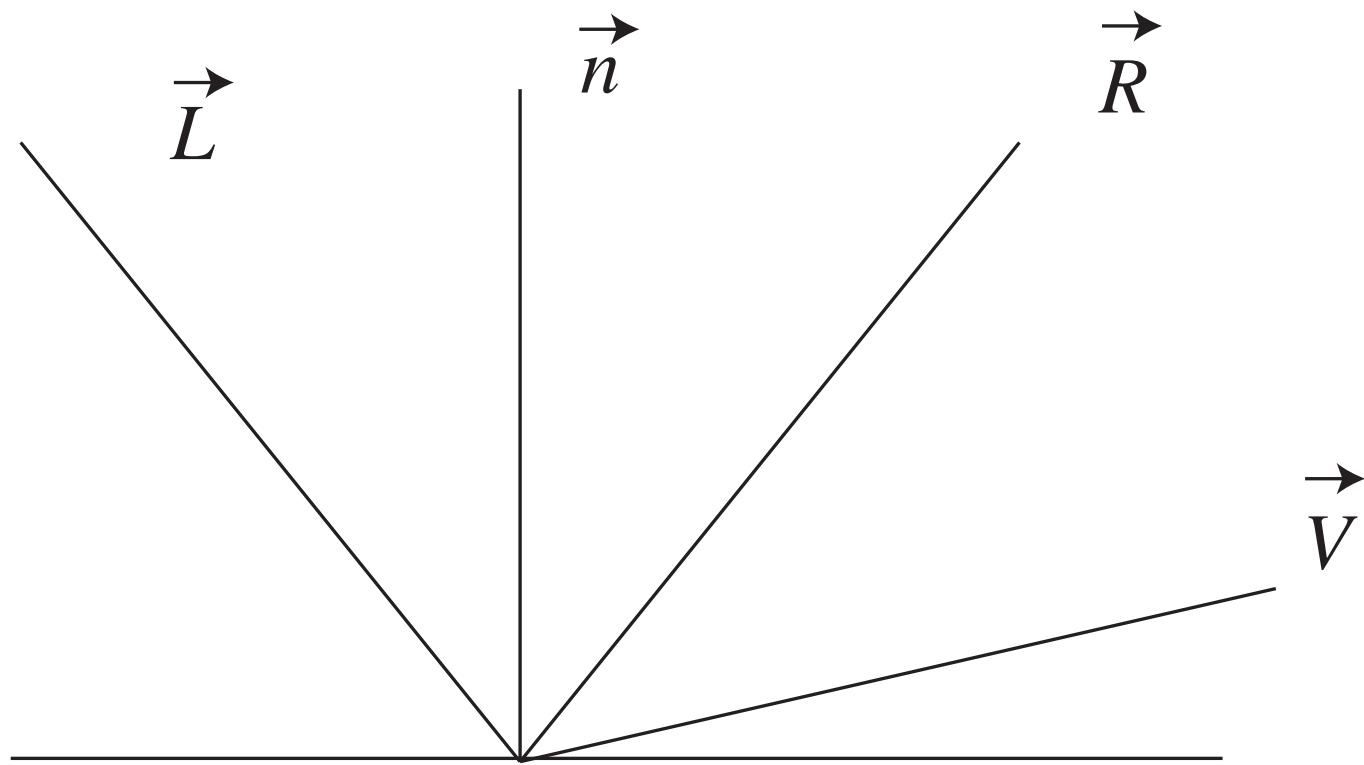
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Notation vectorielle pour modèle tridirectionnel.



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de réflexion bi directionnelle :

- on suppose alors que la source est très loin du plan de réflexion ( $\vec{L}$  est constant sur la surface);
- on suppose aussi que l'observateur est très loin du plan de réflexion ( $\vec{V}$  est aussi constant par rapport à la surface);
- on définira  $\vec{H}$ , un vecteur situé à mi-distance entre  $\vec{L}$  et  $\vec{V}$

$$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{2}$$

- $\vec{H}$  est l'orientation que devrait avoir la surface pour que la réflexion dans la direction  $\vec{V}$  soit maximale (réflexion spéculaire).

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

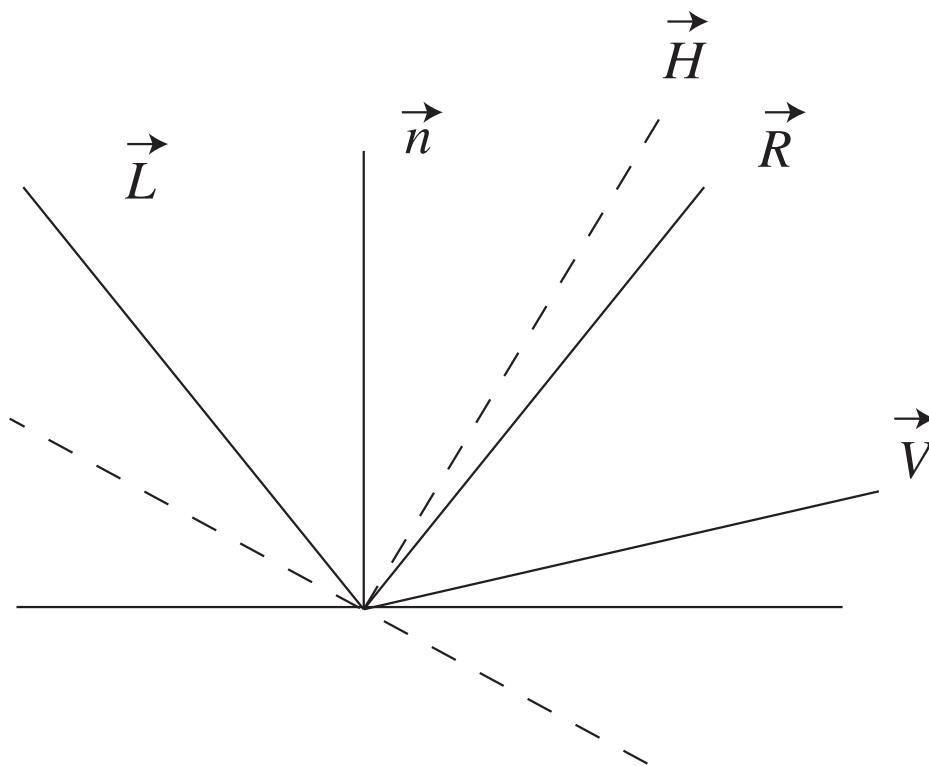
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Définition de $\vec{H}$ .



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- En examinant bien les vecteurs  $\vec{R}$  par  $\vec{H}$  on s'aperçoit que les termes  $\vec{R} \cdot \vec{V}$  et  $\vec{n} \cdot \vec{H}$  ont un comportement semblable.
- Le modèle de réflexion bidirectionnelle sera alors donné par

$$\begin{aligned}I_{\text{RBD}} &= f(\vec{L}, \vec{H}) \\&= k_{\text{ambiante}} I_{\text{ambiante}} + I_i (k_{\text{diffuse}} (\vec{L} \cdot \vec{n}) + k_{\text{sic}} (\vec{n} \cdot \vec{H})^m)\end{aligned}$$

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

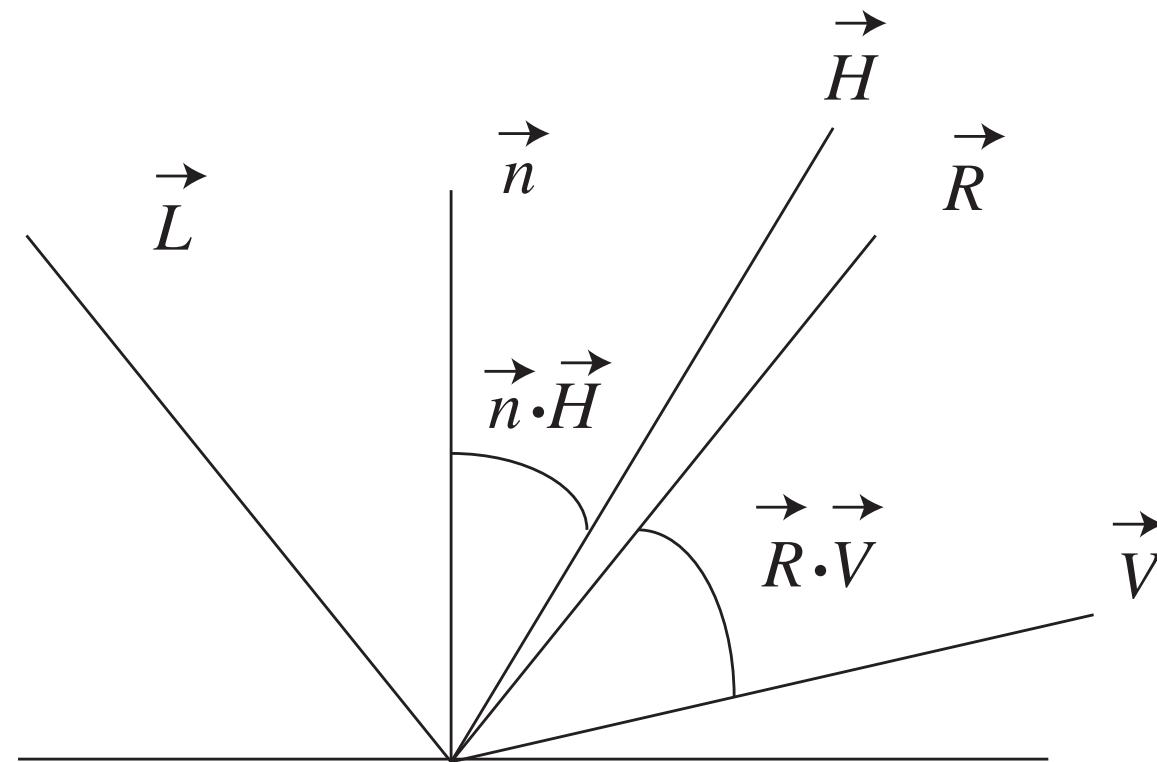
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Notation vectorielle pour modèle bidirectionnel.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- Un des problèmes les plus limitatifs de cette approximation est que l'on suppose que la source est à l'infini.
- On peut remédier ce problème en modifiant l'intensité incidente à partir d'un modèle semblable à celui utilisé pour la réflexion spéculaire imparfaite

$$\tilde{I}_i = I_i (-\vec{L} \cdot \vec{L}_s)^m$$

- Le modèle de réflexion bidirectionnelle sera alors donné par

$$I_{\text{RBD}} = k_{\text{ambiante}} I_{\text{ambiante}} + I_i (-\vec{L} \cdot \vec{L}_s)^m (k_{\text{diffuse}} (\vec{L} \cdot \vec{n}) + k_{\text{si}} (\vec{n} \cdot \vec{H})^m)$$

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

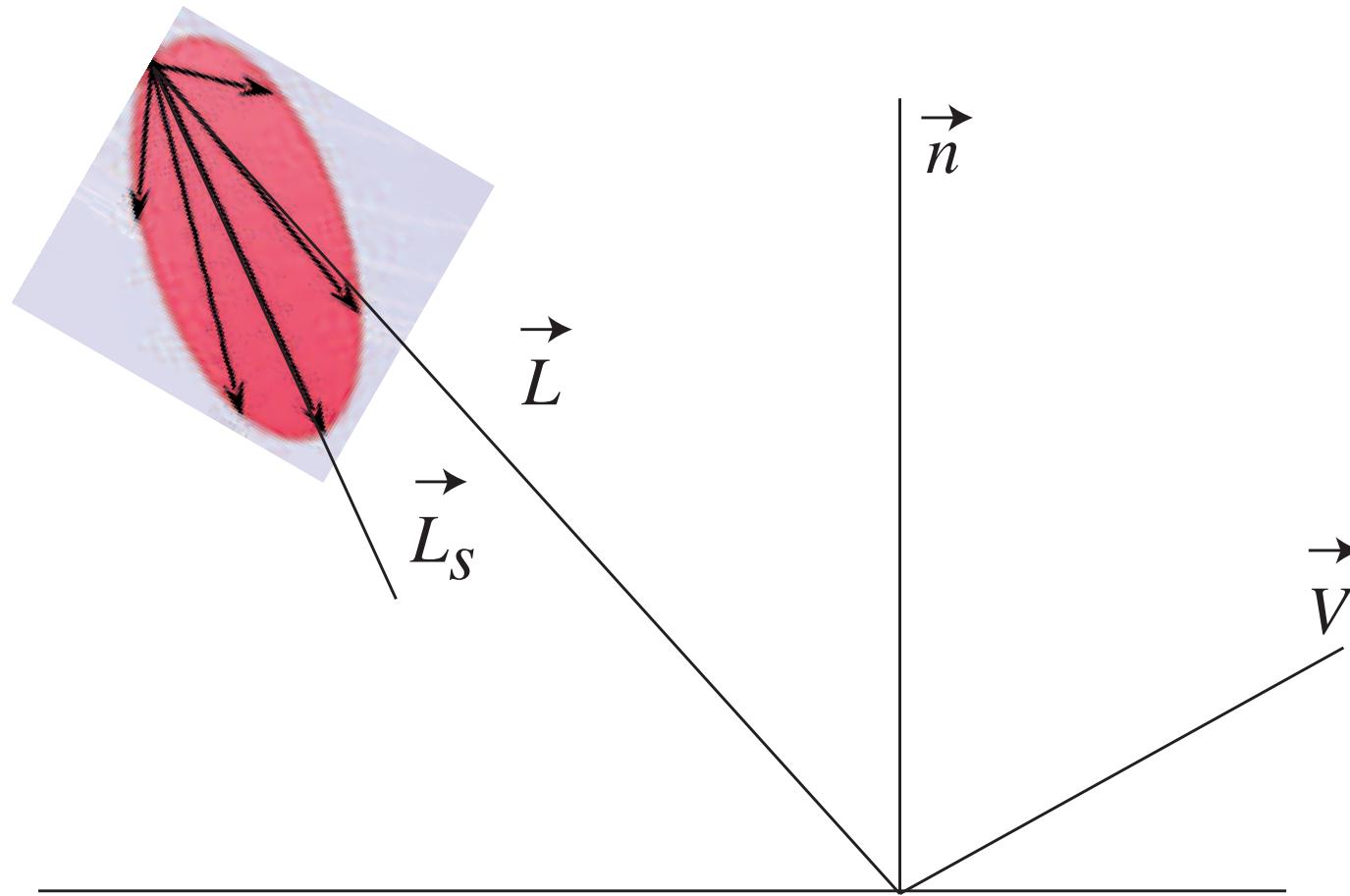
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Source imparfaite



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Notez que :

- ce modèle s'applique à la réflexion à un point dans l'espace ;
- en général, on utilisera la méthode des rayons pour simuler l'intensité due à la réflexion provenant de différents points sur le plan de réflexion ;
- ceci mène aux modèles d'ombres dont celui de Gouraud.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle d'ombres de Gouraud

- On supposera que l'intensité de lumière réfléchie par une surface globale est construite en utilisant une interpolation linéaire à partir des intensités  $I_{\text{RBD}}$  à différents points  $x_i$  sur la surface.
- Pour des surfaces planes en 2D, cette interpolation correspond à

$$\Delta I_{\text{RBD}} = \frac{(I_{\text{RBD}}(x_2) - I_{\text{RBD}}(x_1))}{x_2 - x_1}$$

$$I_{\text{RBD}}(x) = I_{\text{RBD}}(x_1) + \Delta I_{\text{RBD}} \times (x - x_1)$$

pour tout point  $x$  entre  $x_1$  et  $x_2$ .

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- Pour des surfaces planes en 3D, il faut considérer une double interpolation linéaire en  $x$  et  $y$ .
- Pour des surfaces incurvées en 3D, le processus est beaucoup plus compliqué, mais se résume tout de même à des interpolations linéaires en  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

On peut aussi utiliser des modèles d'ombres plus complexes, tel que le modèle de Phong.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

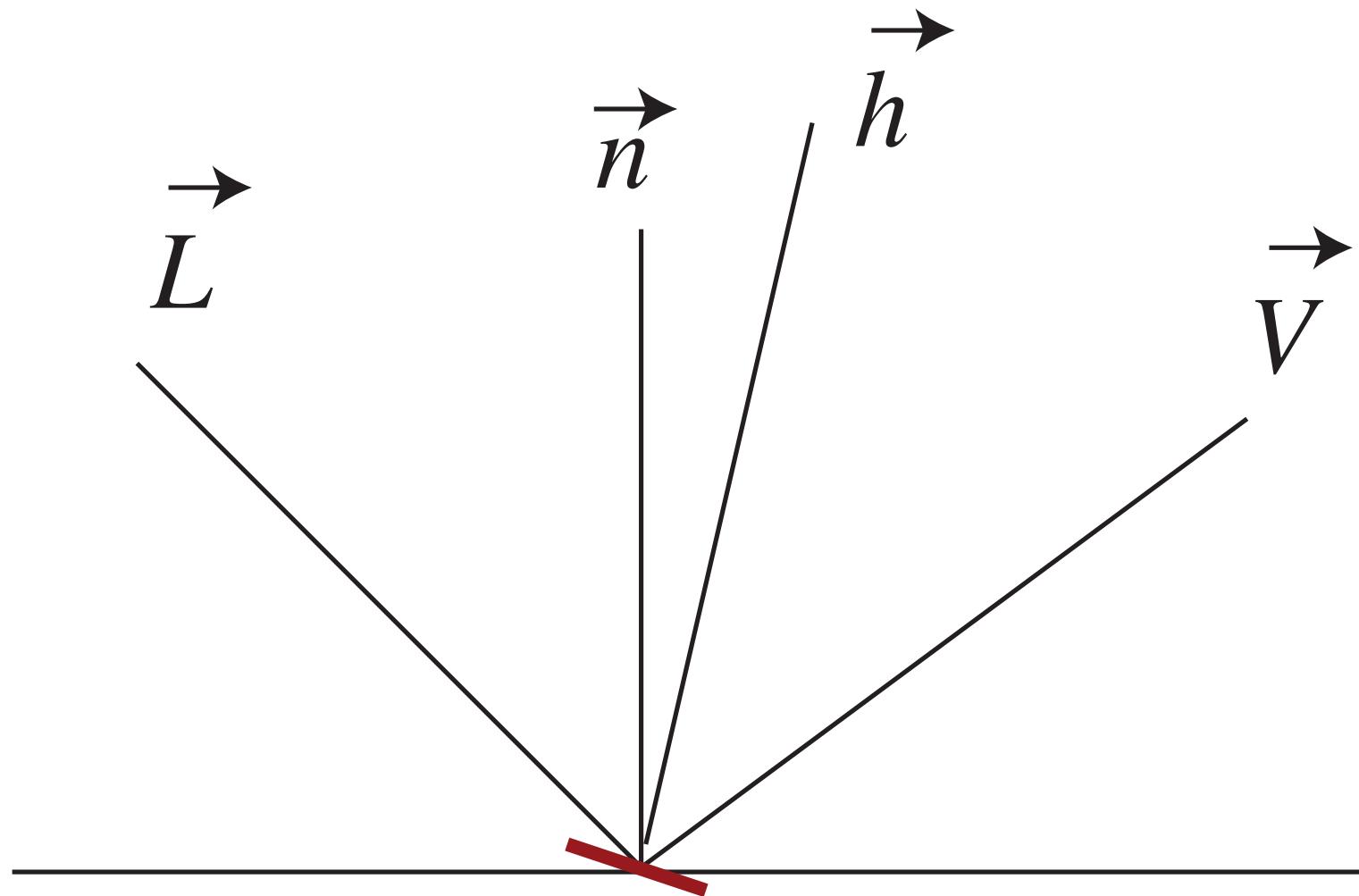
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de Descartes pour surface plane



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## 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

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

- 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.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

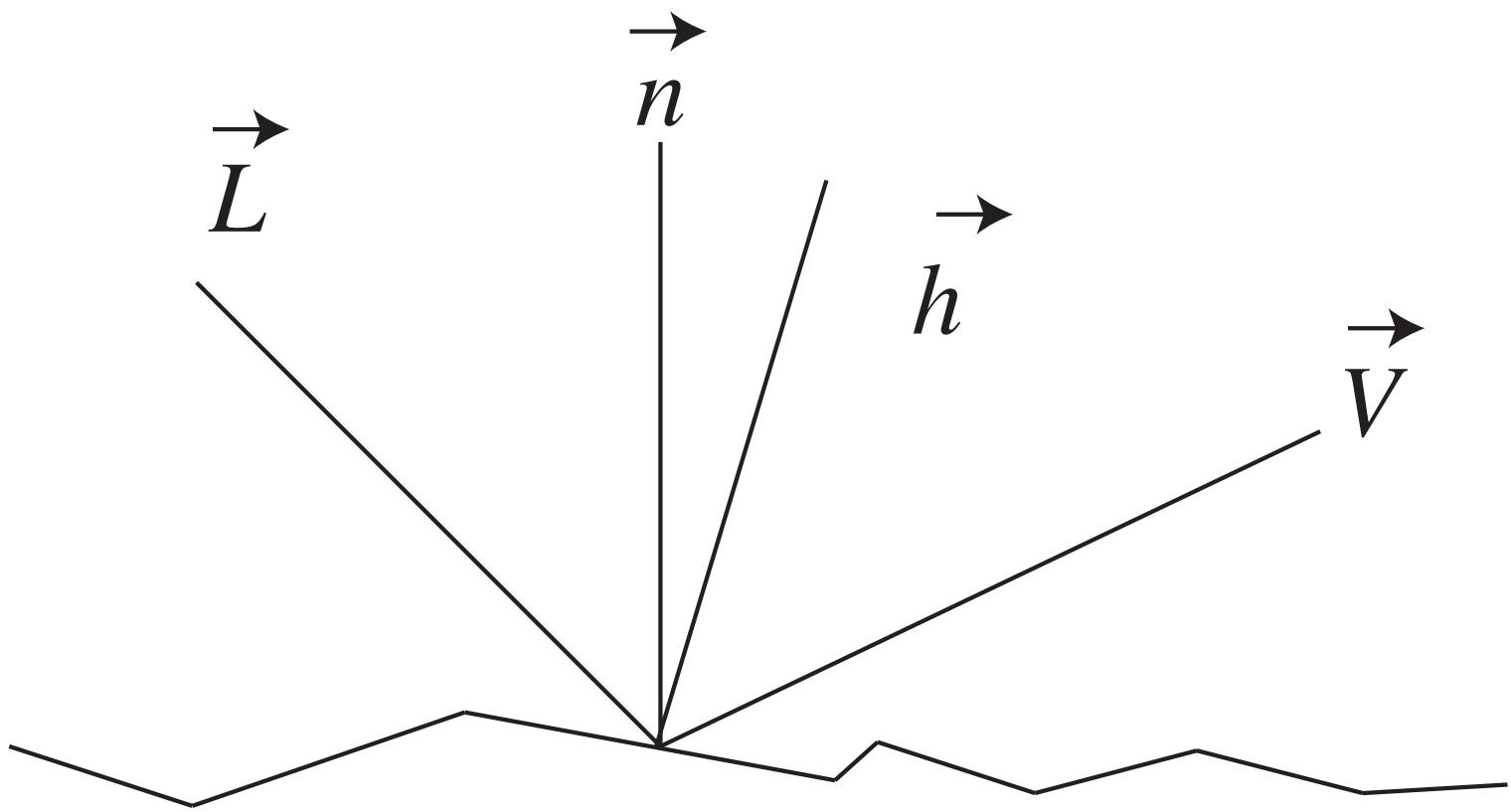
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Modèle de réflexion pour microsurfaces



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Commentaires :

- on supposera que les surfaces tout en étant petites sont cependant plus grandes que la longueur d'onde de la lumière (pour éviter l'apparition de patrons d'interférence) ;
- on supposera aussi que le diamètre du rayon de lumière incident sur la surface est suffisamment grand pour qu'il soit réfléchi par un nombre important de microsurfaces (la distribution statistique a alors sens).

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Méthode d'analyse pour les microsurfaces :

- choisir les dimensions des microsurfaces ( $> 10\mu\text{m}$ ) ;
- s'assurer que le diamètre du rayon de lumière touchant ces microsurfaces est suffisamment grand pour que des rayons lumineux de plusieurs directions les touchent ;
- choisir l'orientation de chaque microsurface à traiter en utilisant un processus aléatoire.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Orientation des microsurfaces :

- choisir deux nombres aléatoires  $U$  et  $V$  entre 0 et 1 (fonction `rand` dans MATLAB) ;
- de ces deux nombres aléatoires déterminer la direction d'une surface (direction de  $\vec{h}$ ) en utilisant

$$\alpha_1 = \sigma \sqrt{-2 \ln U} \cos(2\pi V)$$

$$\alpha_2 = \sigma \sqrt{-2 \ln U} \sin(2\pi V)$$

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- $\alpha_1$  correspondra au sinus de l'angle entre  $\vec{h}$  et  $\vec{n}$  et  $\alpha_2$  à la rotation de la microsurface autour de l'axe  $\vec{n}$  ;
- on générera  $N_s$  surfaces ( $N_s$  directions  $\vec{h}$ ).

Dans MATLAB, on peut aussi générer  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  directement en utilisant la fonction `randn`.

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Analyse :

- générer un grand nombre de rayons de lumière  $N_s$  partant de la source (reproduisant l'ensemble des rayons de lumière pouvant quitter la source et atteindre la surface) ;
- examiner l'intersection de chacun de ces rayons lumineux avec la surface et vérifier, en utilisant la méthode de Descartes, si ces rayons atteignent l'observateur ;

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- déterminer l'intensité de lumière atteignant l'observateur en sommant la contribution de chaque rayon de direction  $i$  ayant atteint l'observateur  $N_o$  après réflexion sur une des surfaces

$$I_r = \sum_i I_s \frac{N_o}{N_s}$$

avec  $I_s$  l'intensité de la source.

Dans le modèle RBS, cette intensité détermine la contribution spéculaire imparfaite.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Effets d'ombre et de masque

- Comme de raison, cette méthode ne prend pas en compte l'effet d'ombre, car seulement une surface est traitée à la fois.
- Elle ne prend pas en compte non plus l'effet de masque.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

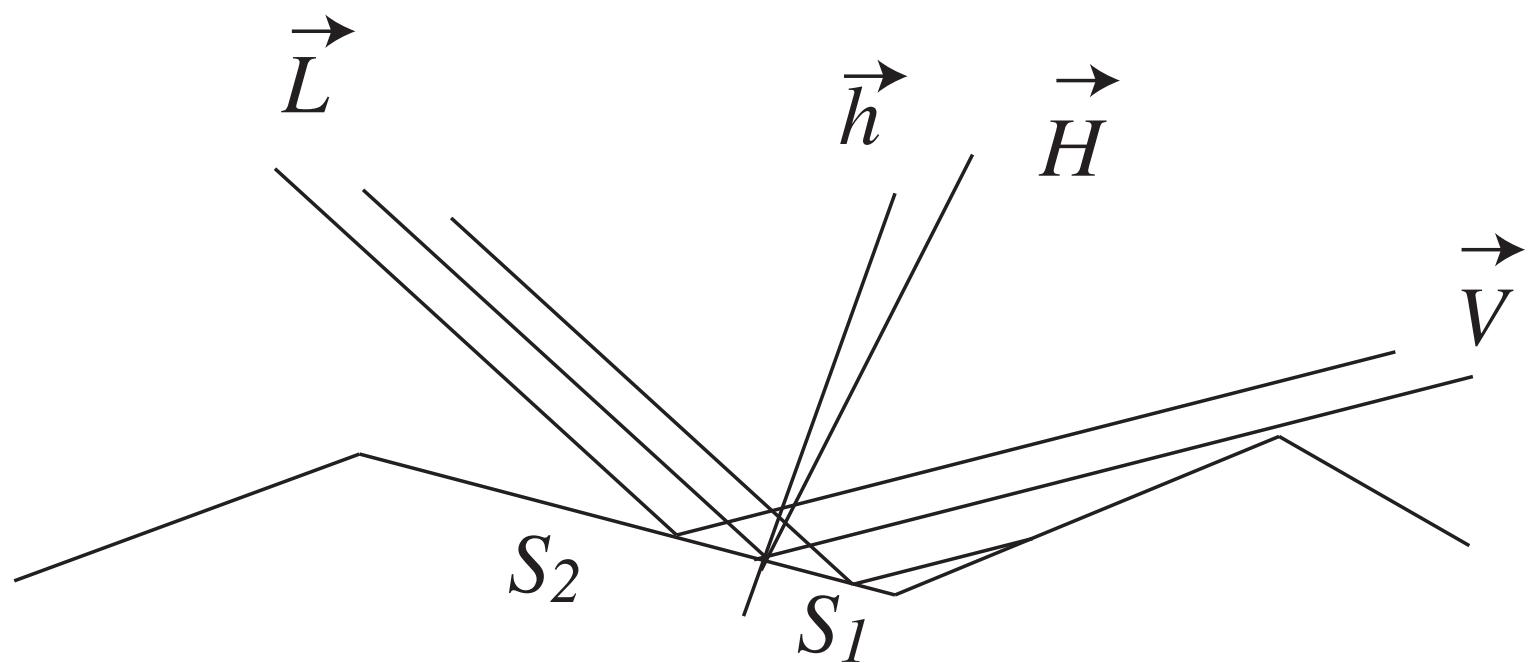
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Effet d'ombre



Description de la lumière

Réflexion et réfraction

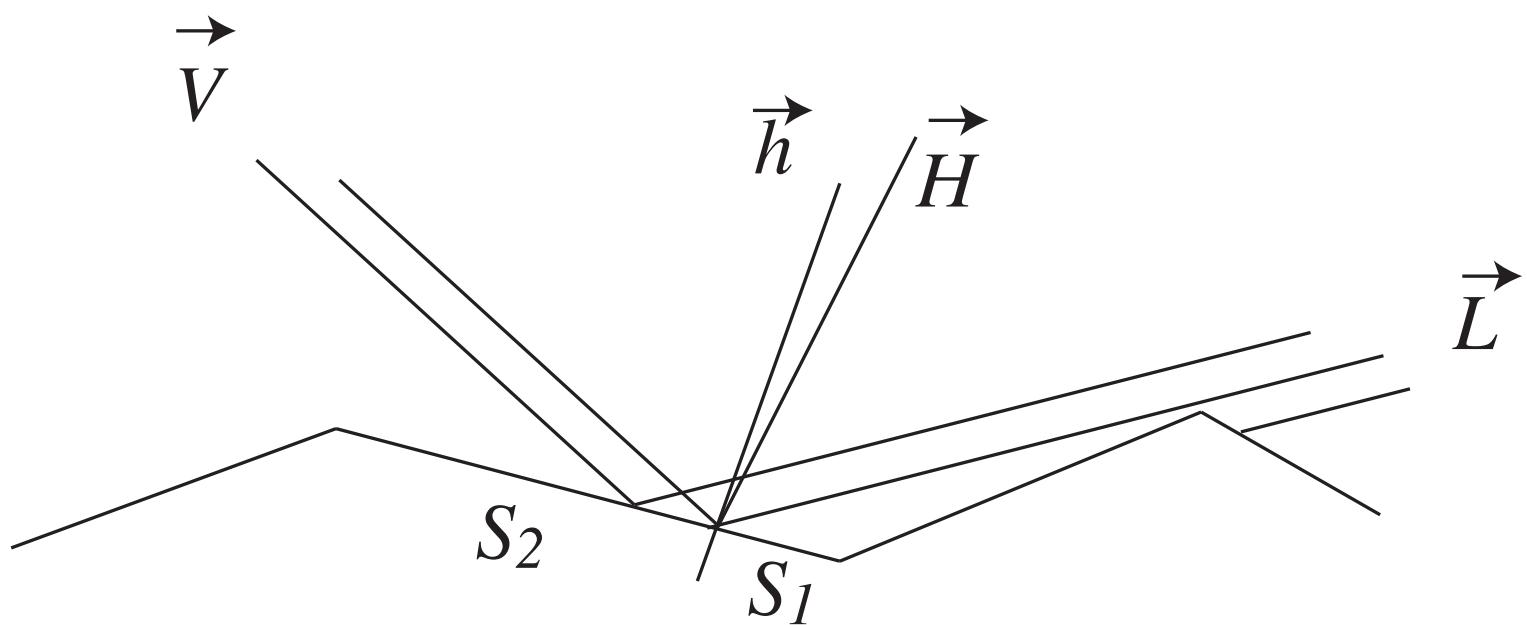
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Effet de masque



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- On tient compte des effets d'ombre et de masque en réduisant l'intensité de la lumière perçue par un facteur  $G$ .
- Ce facteur est proportionnel au rapport entre la surface qui peut transmettre de la lumière à l'observateur  $S_2$  et la surface totale  $s_t = S_1 + S_2$  de la microsurface

$$G = \frac{S_2}{S_1 + S_2}$$

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Observations :

- dans le cas où  $S_1 = 0$ ,  $G = 1$  ;
- une analyse détaillée de la dépendance de  $S_2/S_t$  sur les vecteurs  $\vec{L}$ ,  $\vec{V}$  et  $\vec{H}$  pour l'ombrage mène à la relation

$$G_o = \frac{2(\vec{h} \cdot \vec{H})(\vec{h} \cdot \vec{V})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})}$$

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- pour l'effet de masque on n'a qu'à échanger  $\vec{V}$  et  $\vec{L}$  sachant que  $(\vec{V} \cdot \vec{H}) = (\vec{L} \cdot \vec{H})$

$$G_m = \frac{2(\vec{h} \cdot \vec{H})(\vec{h} \cdot \vec{L})}{(\vec{V} \cdot \vec{H})}$$

- finalement, le terme  $G$  se calcule en utilisant

$$G = \min(1, G_o, G_m)$$

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Terme de Fresnel

- On a déjà vu que le coefficient de réflexion de Fresnel pour une réflexion parfaite était donné par

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

avec

$$\cos(\theta_i) = (\vec{L} \cdot \vec{n})$$

$$\cos(\theta_t) = -(\vec{T} \cdot \vec{n})$$

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

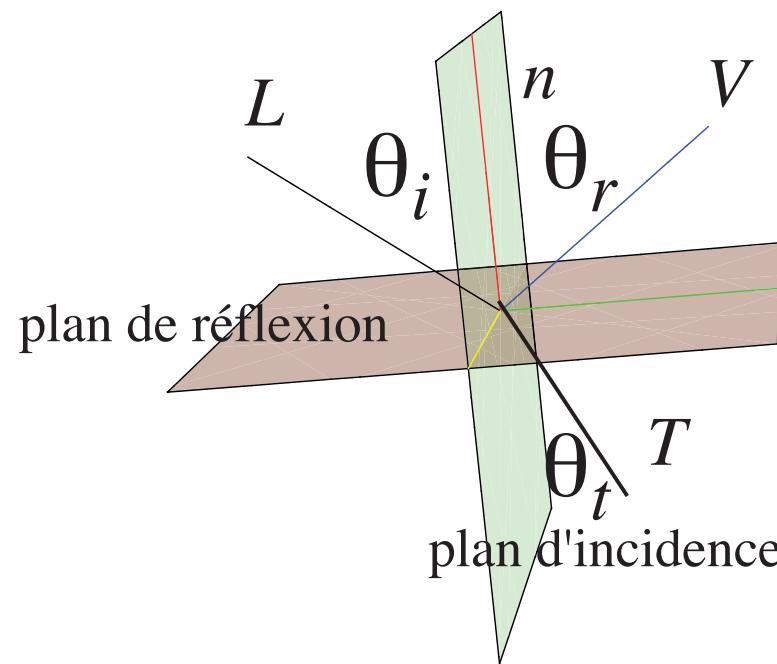
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Notation.



# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- On remplacera cette relation exacte par un coefficient de réflexion approximatif, le terme de Fresnel, de la forme

$$\tilde{R} = \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 1)^2} + (1 - (\vec{L} \cdot \vec{n}))^5 \frac{(\mu + 1)^2 - (\mu - 1)^2}{(\mu + 1)^2}$$

où  $\mu$  est une constante qui dépend du matériel.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Terme géométrique

- Un dernier effet dont il faut tenir compte dans le modèle physique est le terme d'éblouissement («glare effect»).
- Cet effet est entièrement géométrique et représente le fait que lorsque l'observateur se situe à 90 degrés de la normale ( $\vec{n} \cdot \vec{V} \rightarrow 0$ ) l'observateur voit de plus en plus de microsurfaces.

# Réflexion diffuse et absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- L'intensité doit alors être multipliée par

$$k_G = \frac{1}{\vec{n} \cdot \vec{V}}$$

- Cet effet étant contrecarré par les effets d'ombrage et de masque que nous avons déjà vu.
- En fait, il est surtout utile pour amplifier certains effets de couleur pour des surfaces que nous observons de côté.

# Absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

L'absorption de la lumière peut être due à plusieurs causes :

- effet de Fresnel (continuité des champs électromagnétiques) ;
- absorption par une surface (en général, une surface colorée absorbera toutes les autres couleurs) ;
- son passage à travers un matériel turbide (nuages, eau trouble) que nous discuterons ici.

# Absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

L'absorption de la lumière à travers un matériel turbide :

- en réalité, la réduction dans l'intensité de la lumière est principalement due à la diffusion de la lumière par les solides ou liquides en suspension dans un milieu transparent ;
- l'intensité dans ce cas peut généralement être calculée en utilisant

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d}$$

où  $\mu$  est le coefficient d'atténuation linéaire de la lumière et  $d$  la distance que la lumière a parcourue.

# Absorption

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Une deuxième option consiste à simuler l'absorption et la diffusion en utilisant des principes physiques de base :

- on peut alors analyser l'atténuation de la lumière en utilisant la même méthode des ombres ;
- on supposera dans ce cas que les solides sont distribués de façon aléatoire dans l'espace (grains de neige, gouttes de pluie, poussières).

# Ombres

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Ici, nous décrirons brièvement comment reconstruire l'ombre d'un objet pour :

- une source de lumière ponctuelle ;
- une source ponctuelle à l'infini ;
- une source étendue.

Ici, nous utiliserons la méthode des rayons.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Sources ponctuelles

- La position de la source est  $\vec{r}_s$ .
- Le centre de masse de l'objet de volume  $V$  est  $\vec{r}_c$ .
- L'ombre est projetée sur un plan  $S$ .

# Ombres

Description de la lumière

Réflexion et réfraction  
Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Solide composé de surfaces planes vers une surface plane.

- Tracer les rayons entre la source et le plan qui passent par les coins du solide  $\vec{r}_{i,c}$ .
  - ◆ La direction des lignes sera

$$\vec{n}_i = \frac{\vec{r}_{i,c} - \vec{r}_s}{|\vec{r}_{i,c} - \vec{r}_s|}$$

- ◆ L'équation de la ligne sera

$$\vec{r}_{i,l} = \vec{r}_{i,c} + t\vec{n}_i$$

avec  $t$  un paramètre arbitraire.

- ◆ Déterminer  $t_{i,s}$  qui fait en sorte que la ligne  $\vec{r}_{i,l}$  croise le plan  $S$ .

# Ombres

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

- Tracer sur la surface plane des lignes rejoignant les points obtenus à l'étape précédente ( $\vec{r}_{i,s} = \vec{r}_{i,c} + t_{i,s} \vec{n}_i$ ) et qui lient les points qui sont connectés sur le solide.
- La zone d'ombre est localisée à l'intérieur de la surface maximale couvrant tous les points.

# Ombres

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Solide composé de surfaces planes vers une surface  $S$  de forme arbitraire.

- Tracer les rayons entre la source et le plan qui passent par les coins du solide (voir page 138).
- Tracer des rayons entre la source et le plan qui passent par une série de points choisis sur les arêtes du solide (voir page 138).
- Le nombre de points choisis dépendra de la précision requise pour l'image de l'ombre.
- Tracer sur la surface des lignes rejoignant les points obtenus à l'étape précédente et qui lient entre eux les points correspondants aux arêtes du solide.
- La zone d'ombre est localisée à l'intérieur de la surface maximale couvrant tous les points.

# Ombres

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Solide  $V$  composé de surfaces arbitraires vers une surface  $S$  arbitraire.

- Tracer les rayons entre la source et le plan qui passent par une série de points choisis à la surface du solide (voir page 138).
- Identifier sur le plan la surface externe maximale qui inclut tous ces points.
- La zone d'ombre est localisée à l'intérieur de cette surface.

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Sources à l'infini

- On utilisera un processus semblable à celui des sources ponctuelles, cependant au lieu d'utiliser  $\vec{r}_s$  et  $\vec{r}_{i,c}$  pour déterminer la direction des rayons lumineux, on supposera qu'ils ont tous la même direction  $\vec{n} = \vec{n}_i$  donnée par

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}_c - \vec{r}_s}{|\vec{r}_c - \vec{r}_s|}$$

- Pour les solides avec surfaces planes, on projettera donc les coins et les arêtes du solide sur la surface dans la direction  $\vec{n}$ .
- Pour les autres solides, on projettera les points sur la surface du solide vers la surface dans la direction  $\vec{n}$ .

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

## Sources étendues

- On répétera le processus utilisé pour les sources ponctuelles pour un ensemble de sources localisées à des positions différentes.
- L'ombre absolue correspondra à la surface qui est l'intersection des surfaces d'ombre pour chacune de ces sources de lumière.
- Les régions à l'extérieur de l'union des surfaces d'ombre seront éclairées complètement.
- Les autres régions seront dans une semi-ombre (pénombre) dont la profondeur dépendra du nombre de sources contribuant à leur éclairement.

# Conclusions

Description de la lumière

Réflexion et réfraction

Réflexion diffuse et absorption

Absorption

Ombres

Conclusions

Dans le prochain chapitre, nous étudierons les propriétés de la lumière incluant

- Sources de lumière
- Détection de la lumière
- Perception de la lumière
- Intensité lumineuse