

M4202Cin - Connaissances Complémentaires en Imagerie Numérique

2. Physique de la lumière

2ème année 2018-2019

Sébastien THON

IUT d'Aix-Marseille Université, site d'Arles
Département Informatique

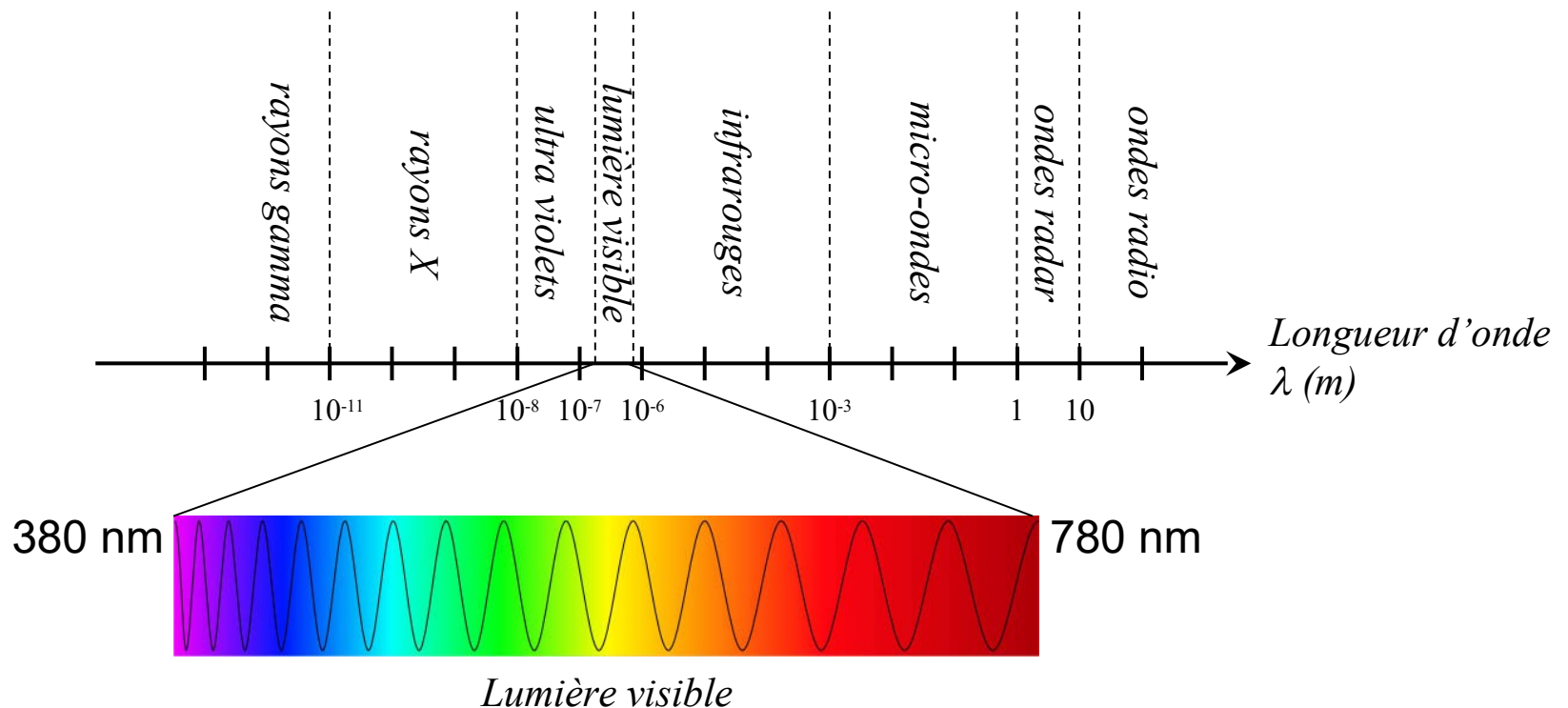
1. Notion de spectre

La lumière est un élément indispensable à la perception de la couleur. Lorsque nous sommes dans le noir, nous sommes incapables de déterminer la couleur d'un objet.

Au même titre que les ondes radio, la lumière peut être définie comme un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire un ensemble de radiations ou d'ondes électromagnétiques produites par la propagation de particules lumineuses, les **photons**.

Une radiation électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde λ exprimée en mètres (m).

Ce que nous appelons **lumière visible** est en fait la partie du rayonnement électromagnétique à laquelle nos yeux sont sensibles. L'œil humain ne perçoit que les ondes électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont comprises entre environ 380 et 780 nanomètres (nm). Ces longueurs d'onde définissent le **domaine du visible**.



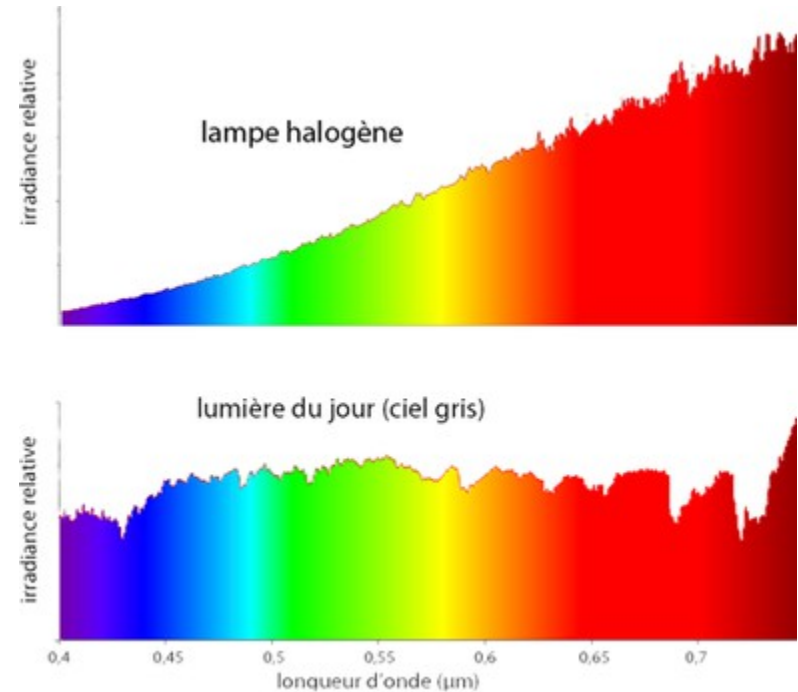
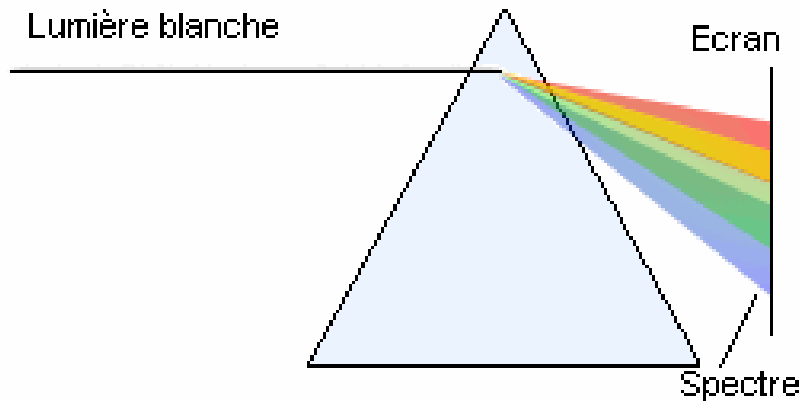
Isaac Newton met en évidence en 1666 qu'il est possible de décomposer la lumière en un **spectre** de rayons lumineux à l'aide d'un prisme de verre → phénomène de **dispersion**.



Chacun de ces rayons est en fait constitué de radiations de même longueur d'onde, dites **monochromatiques**.

Le spectre correspondant à la lumière visible est appelé le **spectre visible**.

On peut représenter un **spectre** par un graphique donnant l'intensité des différentes longueurs d'ondes présentes dans un faisceau de lumière.



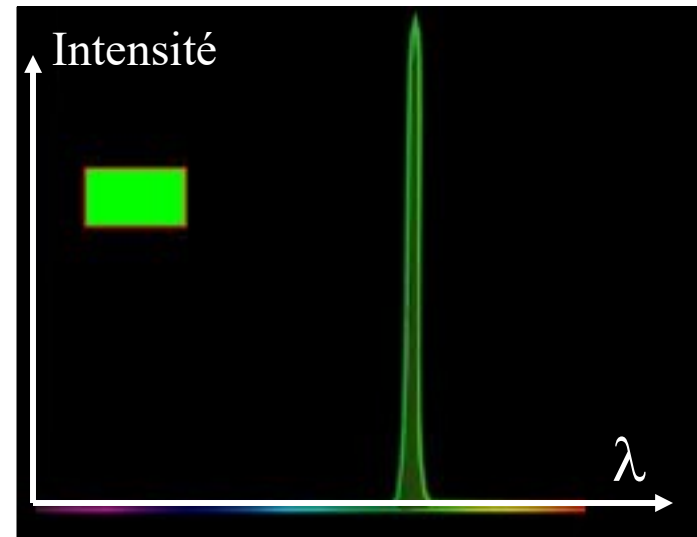
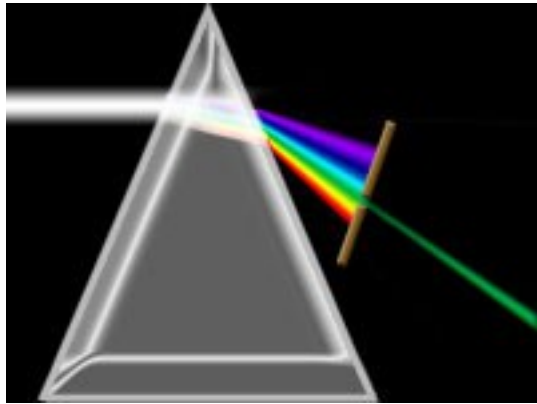
La **lumière blanche** est composée de toutes les longueurs d'ondes visibles.

→ c'est le cas de la lumière émise par le soleil

→ ce n'est pas vrai pour la plupart des sources artificielles

Spectre monochromatique

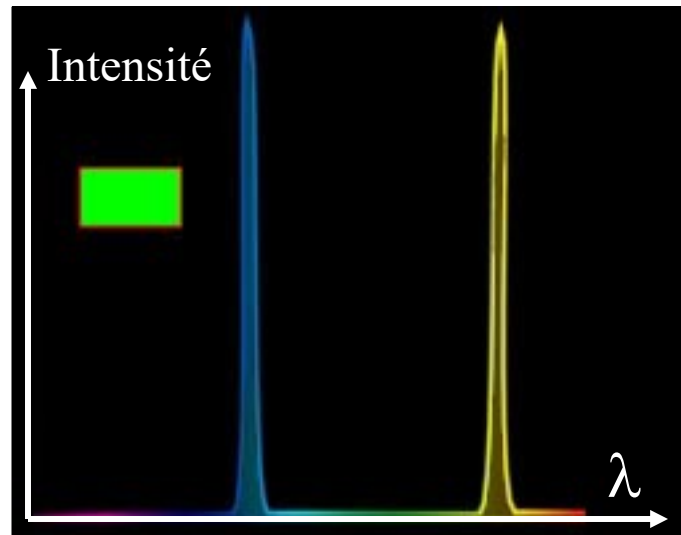
En isolant une seule couleur, on obtient un **spectre monochromatique** composé d'une seule longueur d'onde.



*Décomposition de la
lumière blanche puis
filtrage du spectre*

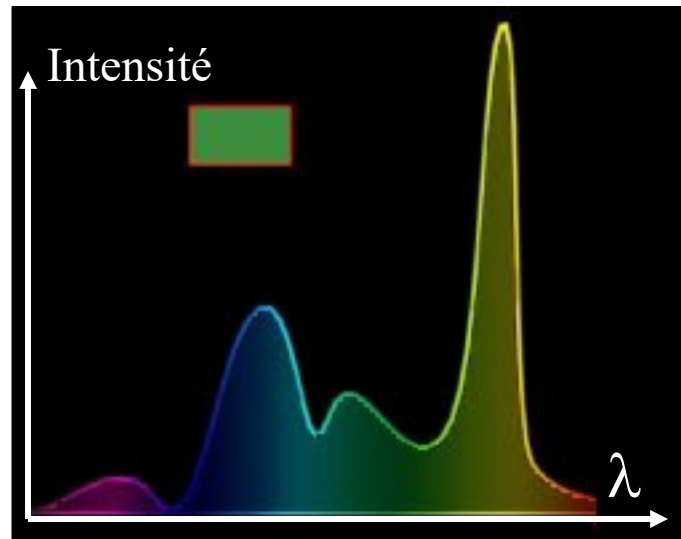
*Spectre d'une lumière verte
monochromatique composé
d'une seule raie*

Notre œil est incapable de discerner le nombre de raies. Une lumière dichromatique de bleu et de jaune sera perçue comme le vert du spectre précédent.



→ Principe de la **synthèse additive** (voir chapitre 4).

En réalité, les sources de lumière ou les surfaces qui renvoient des lumières monochromatiques sont rares (Exemple : les lasers).



La plupart du temps, les couleurs que nous voyons sont des compositions continues de toutes les longueurs d'ondes.

2. Les sources de lumière

2.1 Sources naturelles

- Le soleil

Il émet des radiations sur une plage de longueurs d'ondes infinie.

Le rayonnement ultraviolet est partiellement arrêté par la couche d'ozone.

Le rayonnement infrarouge est absorbé en partie par la vapeur d'eau de l'atmosphère.

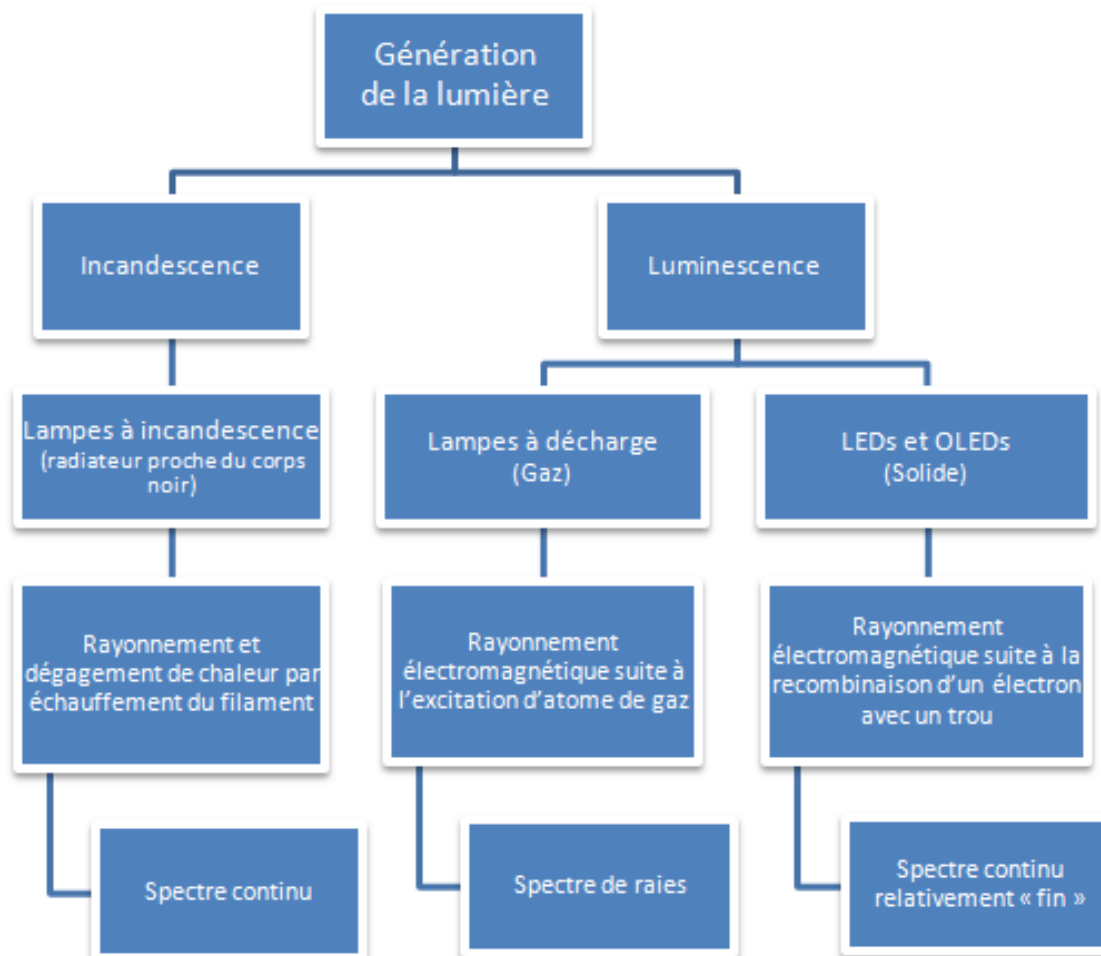
- Feu, éclairs, aurores boréales

- Sources bio-luminescentes

Lucioles, plancton, poissons, champignons.

2.2 Sources artificielles

Deux principes **incandescence** et **luminescence**



2.2.1 Incandescence

Production de lumière par élévation de la température d'un corps solide, liquide ou gazeux.

Dans une lampe à incandescence, l'électricité porte à haute température un filament de tungstène enfermé dans une ampoule en verre vide d'air ou remplie de gaz inertes.

Les radiations thermiques obtenues émettent alors un spectre continu de lumière visible.

2.2.2 Luminescence

La luminescence est le rayonnement (non thermique...) émis par un gaz ou une vapeur métallique soumis à des décharges électriques. Ce rayonnement ne couvre pas forcément tout le spectre visible.

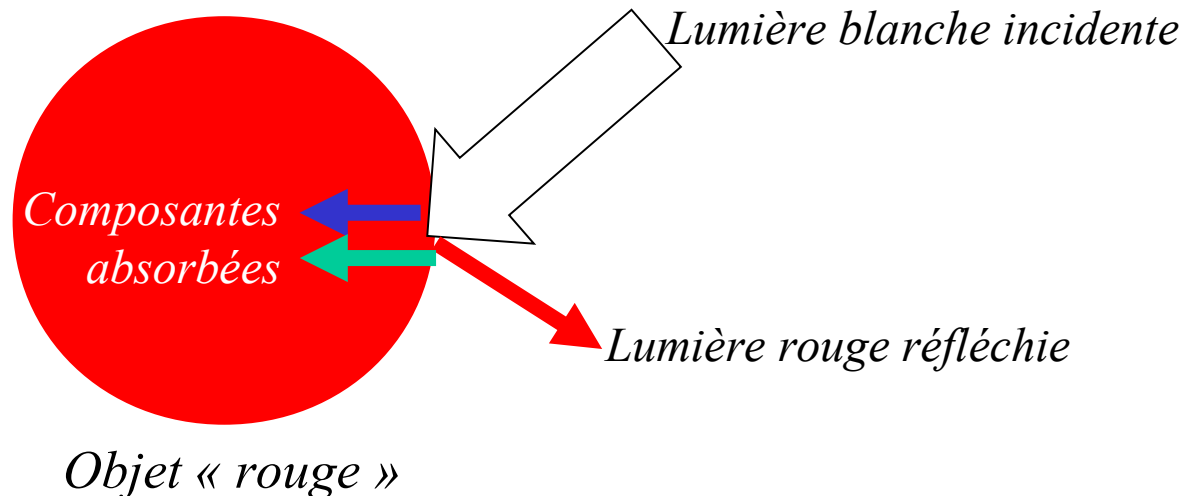
Ces décharges sont intermittentes, la lumière émise également, à la fréquence des décharges (par exemple à la fréquence du courant alternatif).

Ce principe a donné le jour à toutes les lampes à décharge basse et haute pression actuelles.

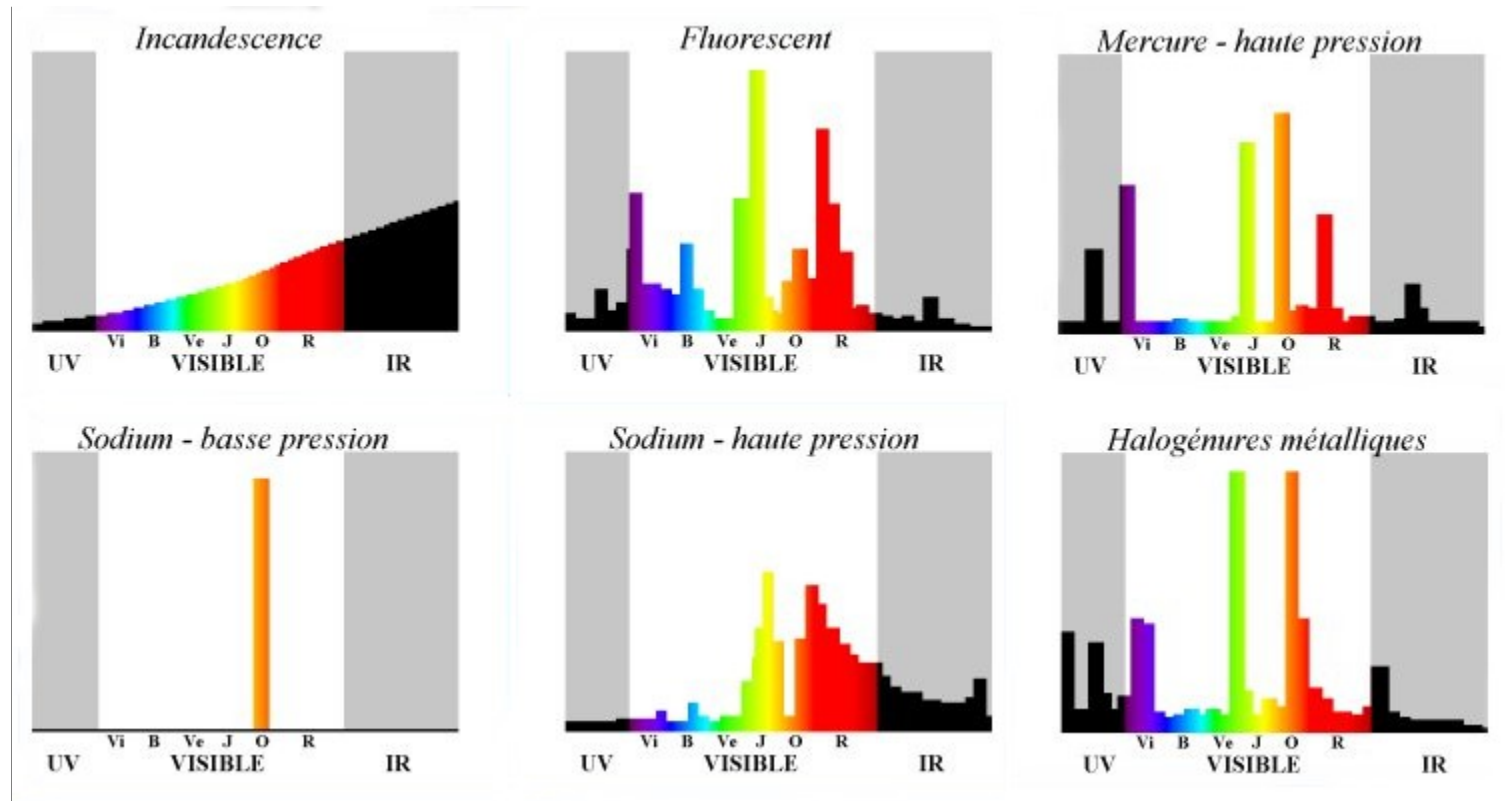
3. Couleur des objets

Les objets que nous voyons sont colorés parce qu'ils absorbent certaines longueurs d'ondes et en réfléchissent d'autres.

Les objets blancs réfléchissent toutes les longueurs d'onde de la lumière, et les objets noirs les absorbent toutes. De même, une pomme rouge réfléchit principalement de la lumière rouge, et l'herbe réfléchit principalement de la lumière verte.



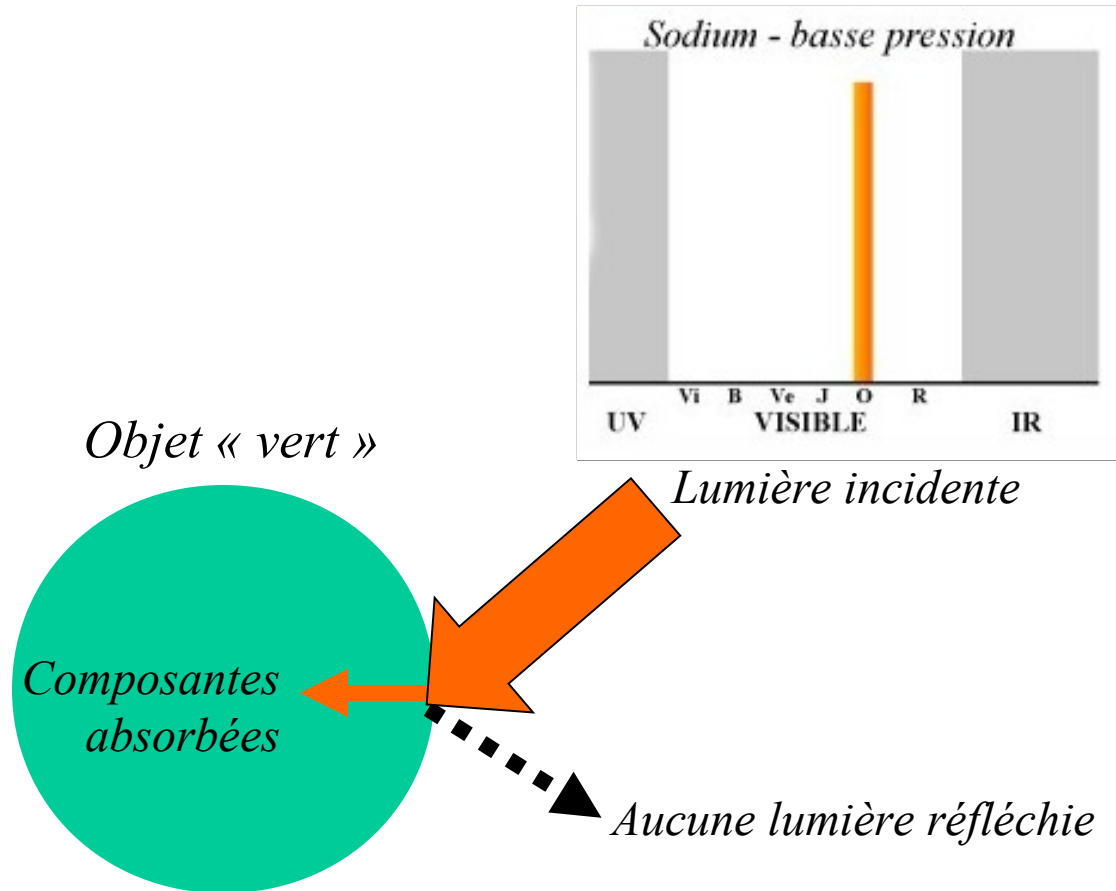
Problèmes liés à l'utilisation de sources lumineuses artificielles



Les différents types d'éclairages artificiels ne reproduisent pas parfaitement le spectre visible

→ Problème de restitution des couleurs sous ce type d'éclairage.

Exemple

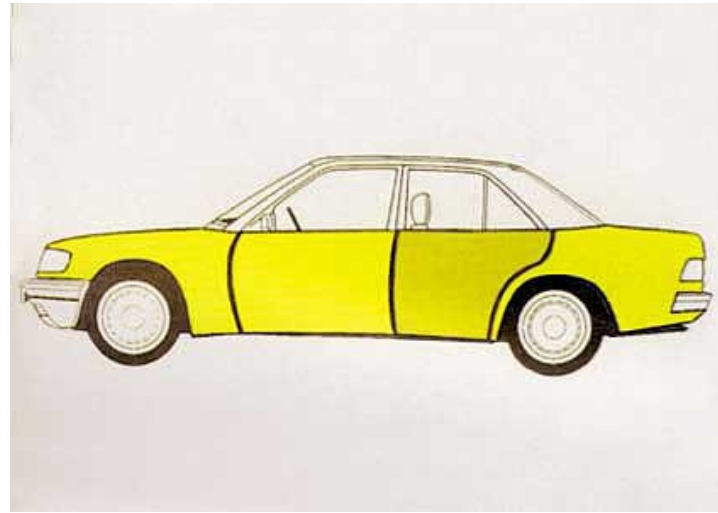
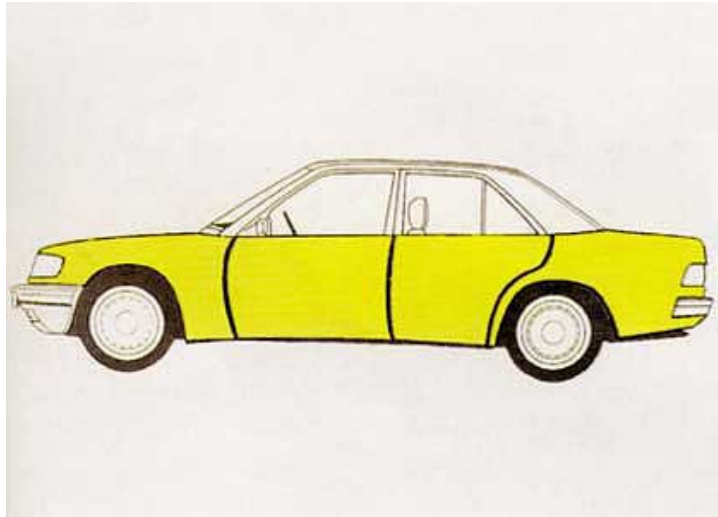


Un objet, vert sous une lumière blanche, apparaîtra noir sous un éclairage par une lampe à sodium basse pression.

Métamérisme

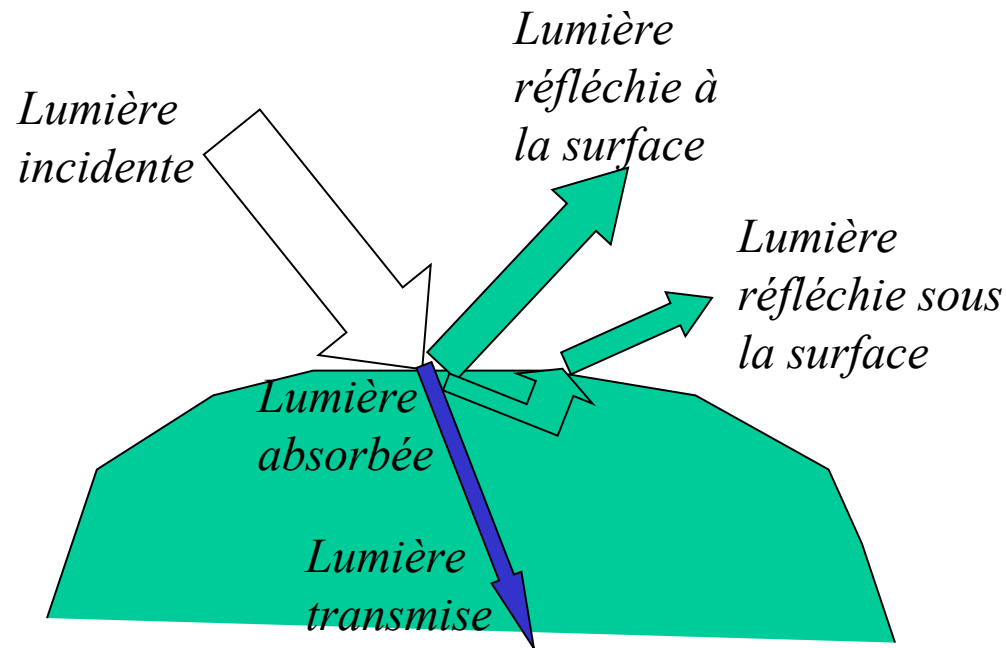
On appelle couleurs « **métamères** » deux couleurs qui semblent identiques sous un éclairage, mais qui apparaissent différentes sous un autre éclairage.

Exemple : remplacement d'une porte de voiture ayant une couleur métamère à celle d'origine sous la lumière du soleil, mais se révélant différente à la lumière artificielle d'un parking.



Lorsque la lumière frappe la surface d'un objet, on peut observer les phénomènes de :

- Réflexion à la surface
- Transmission (Réfraction)
- Absorption
- Réflexion sous la surface



4. Réflexion de la lumière

4.1 Principe

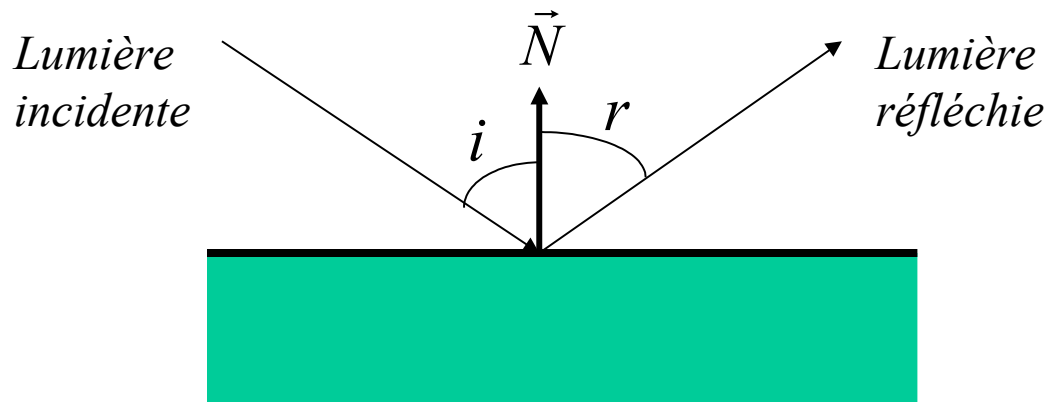
La lumière se propage en ligne droite et tout objet opaque lui fait obstacle. Comme le son, la lumière peut rebondir sur une surface : ce phénomène est appelé **réflexion**.

La majeure partie de la lumière qui atteint nos yeux a été réfléchi par les objets qui nous entourent.

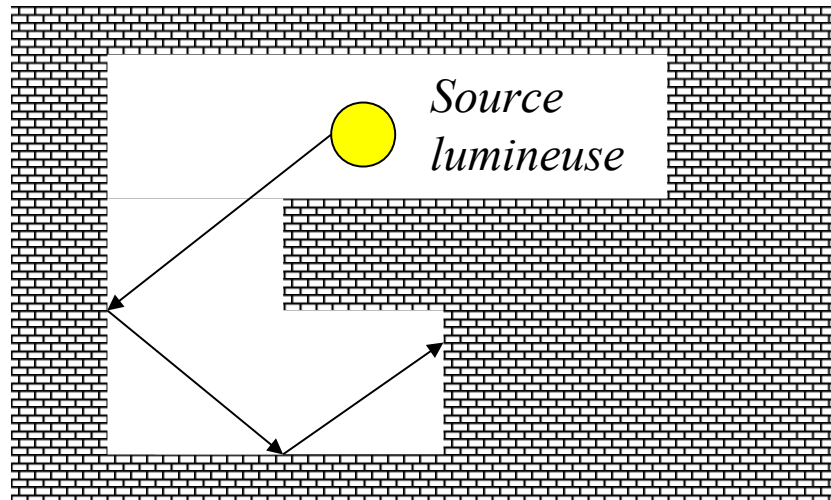
4.2 Loi de réflexion

Selon la loi de **Descartes – Snell**, la lumière incidente en un point d'une surface selon un certain angle par rapport à la normale de la surface en ce point est réfléchi selon le même angle.

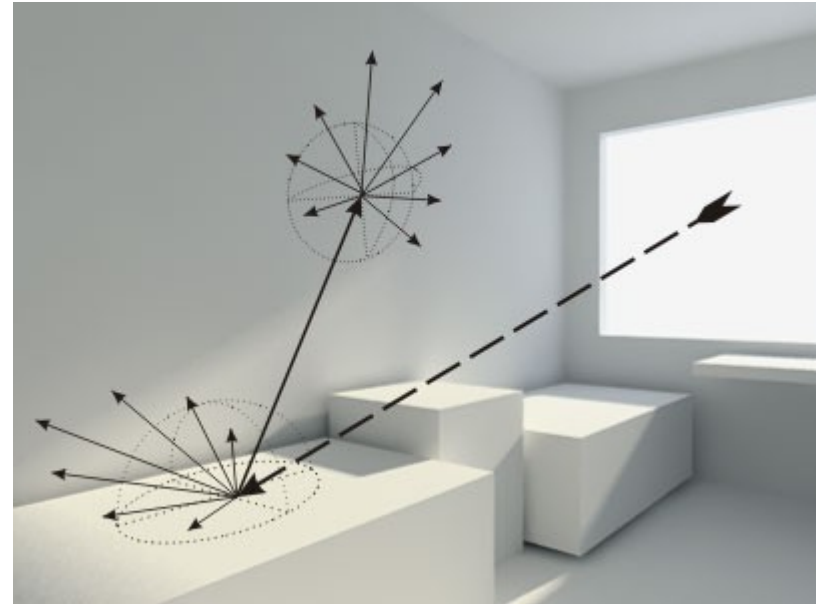
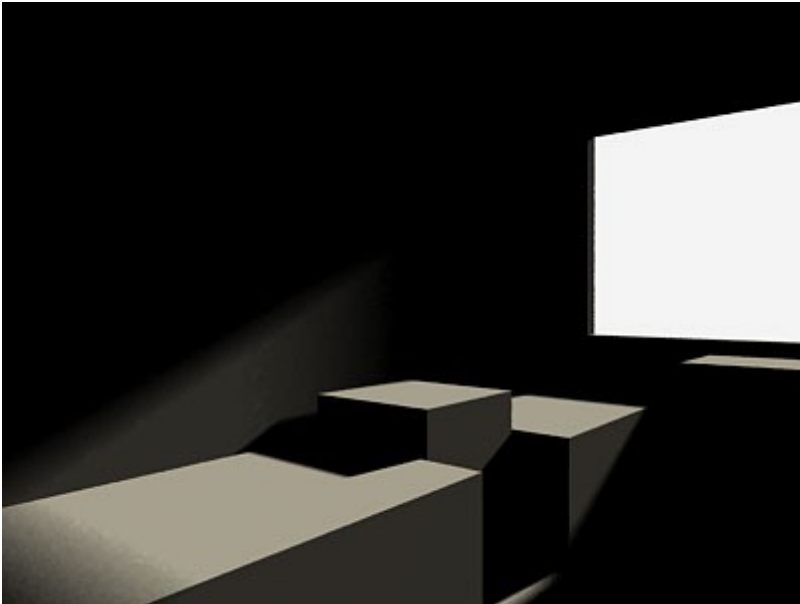
$$i = r$$



La lumière peut être réfléchiée successivement par plusieurs surfaces et ainsi parvenir jusque dans des zones qui ne sont pas directement éclairées par les sources de lumière.



Dans un algorithme de synthèse d'image, si les rebonds successifs de la lumière ne sont pas pris en compte, les parties de la scène qui ne sont pas directement éclairées seront noires.



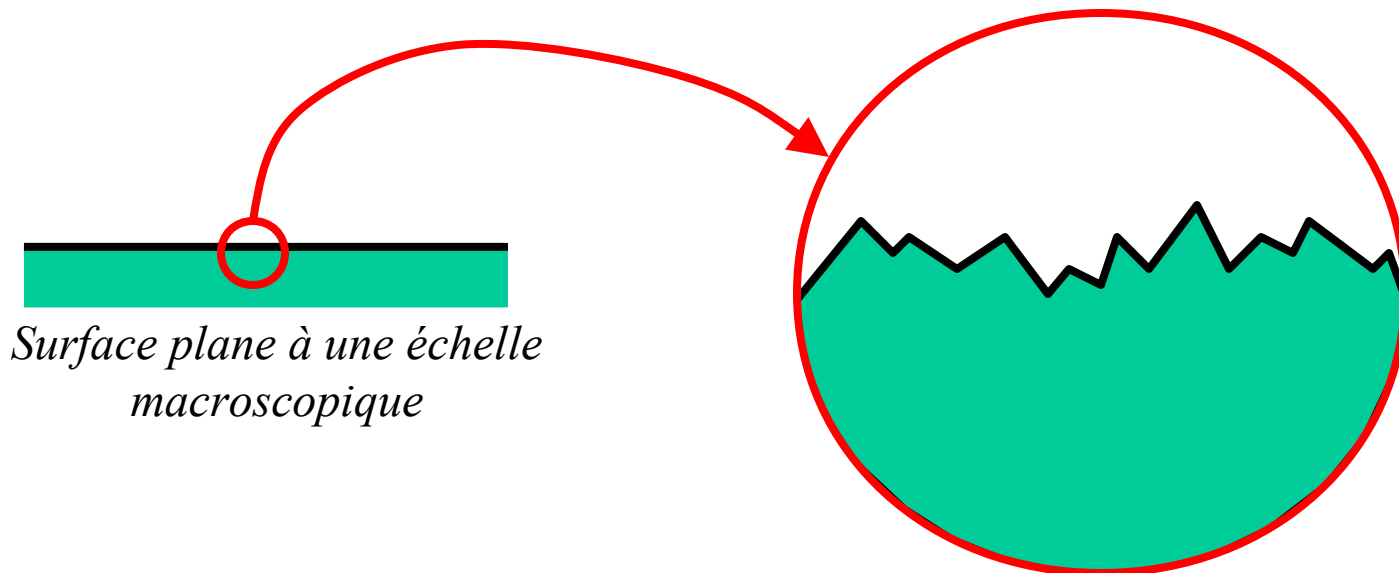
Note : en synthèse d'image, ce mécanisme est simulé par diverses techniques, comme la **radiosité** (voir cours de rendu), le path tracing, etc.

Avec OpenGL, on imite l'effet de cet éclairage indirect avec la composante ambiante de la lumière et des matériaux.

4.4 Réflexion de la lumière dans la réalité

La lumière incidente sur une surface n'est réfléchie comme on vient de le voir que dans le cas de miroirs parfaits.

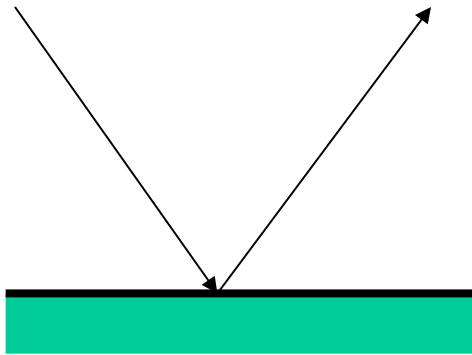
En pratique, les surfaces réelles ont des défauts à un niveau microscopique.



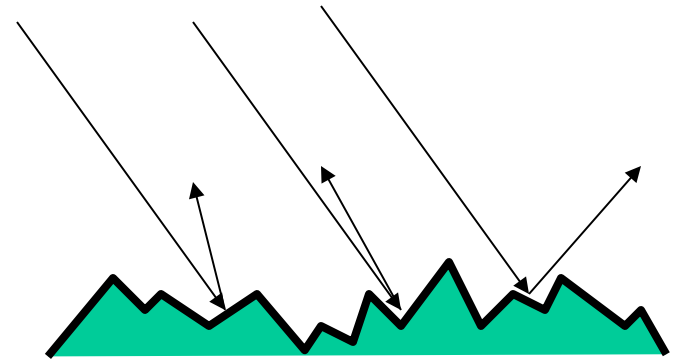
*Surface plane à une échelle
macroscopique*

*Agrandissement à une échelle microscopique
montrant les imperfections de la surface.*

→ La lumière n'est pas réfléchiée dans une direction unique mais dans un **ensemble de directions** dépendant des propriétés microscopiques de la surface.



Miroir parfait théorique

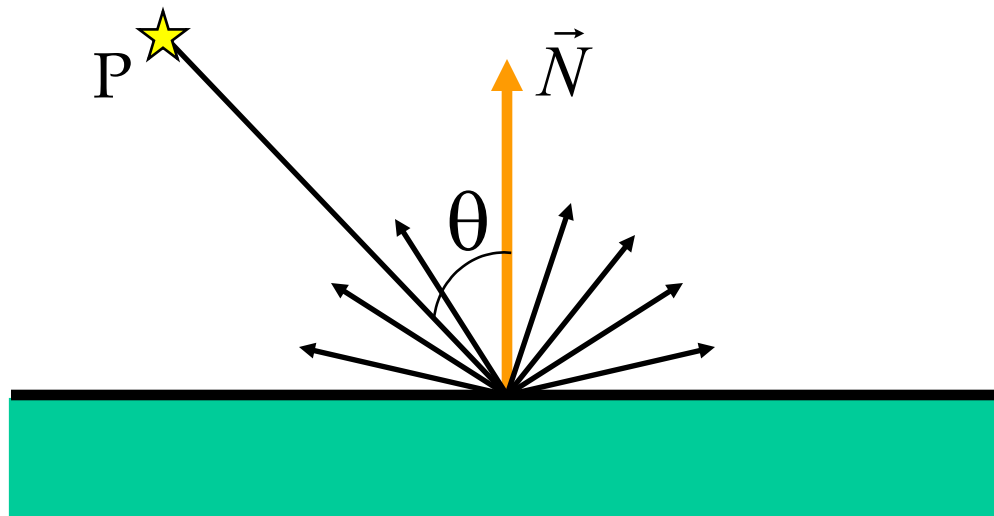


Surface imparfaite réelle

→ Ces directions sont réparties selon une composante **diffuse** et une composante **spéculaire**.

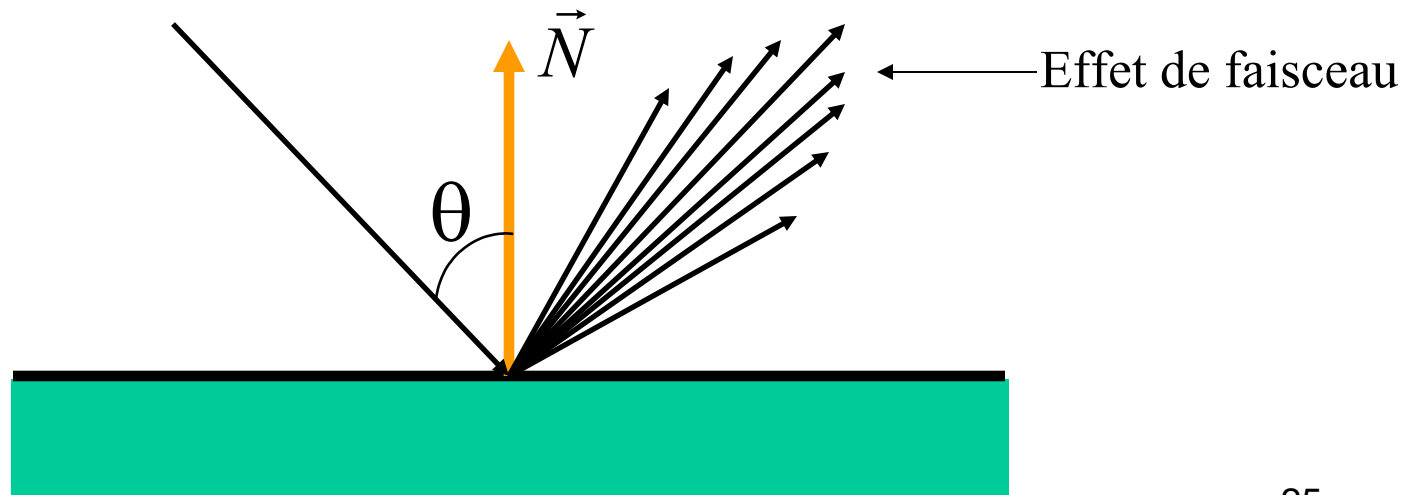
4.4.1 Réflexion diffuse

- La lumière incidente est réfléchiée dans toutes les directions.
- L'intensité réfléchiée ne dépend que de l'angle θ entre la direction de la source et la normale.
- L'intensité diffuse est maximale pour $\theta = 0$ (source de lumière à la verticale de la surface)
- Elle est nulle pour un éclairage rasant ($\theta=90^\circ$)



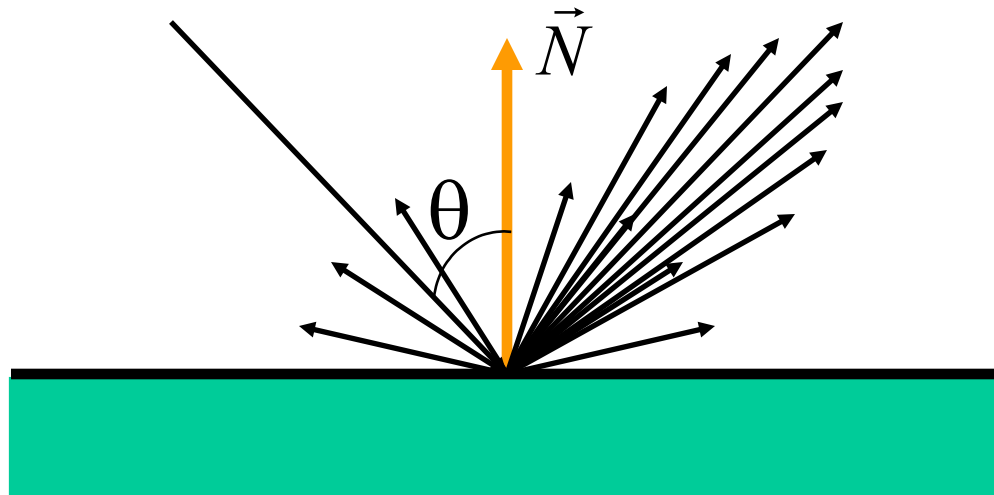
4.4.2 Réflexion spéculaire

- La lumière est réfléchié principalement dans la direction de réflexion parfaite.
- L'intensité de la lumière réfléchié diminue lorsqu'on s'éloigne de cette direction parfaite.

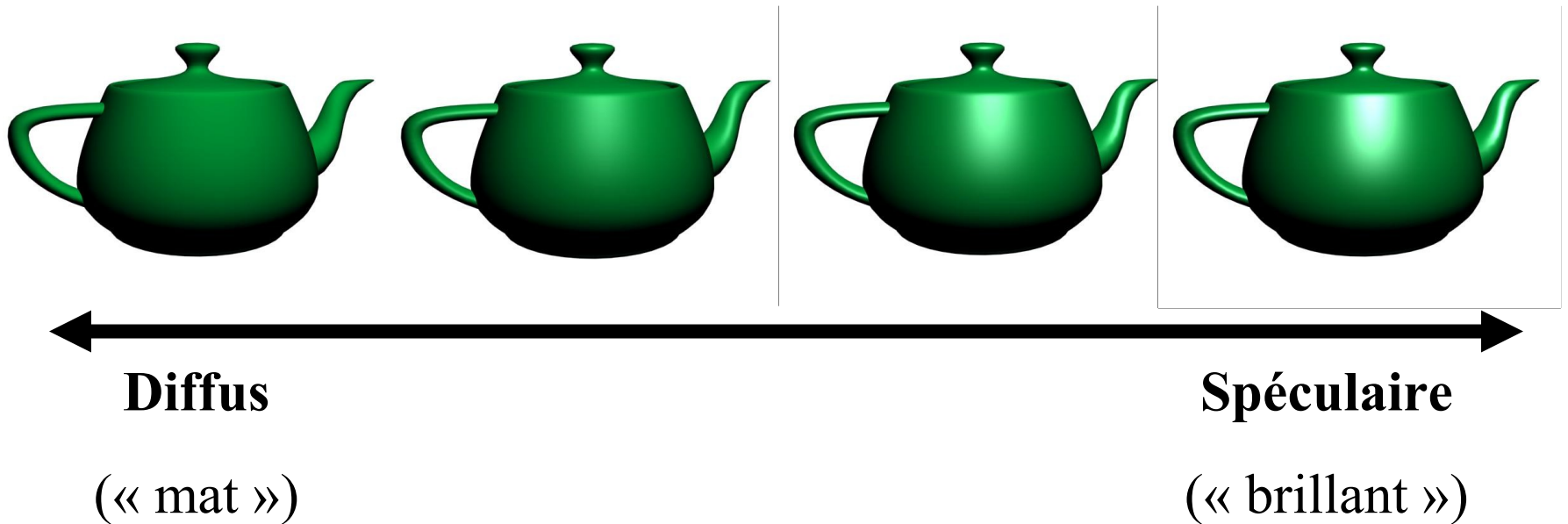


4.4.3 Réflexion finale

- Dans la réalité, la lumière réfléchiée par une surface est constituée par la somme de la réflexion diffuse et de la réflexion spéculaire.
- Cette fonction finale qui donne les directions de réflexion de la lumière en fonction de la lumière incidente est appelée une **BRDF** (*Bidirectional reflectance distribution function*).

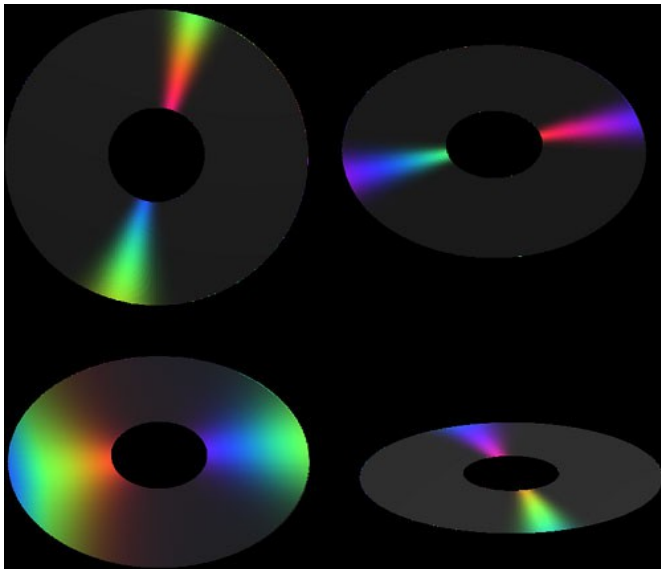


Les proportions de réflexion diffuse et spéculaire dépendent du matériau. Certains sont plus diffus (craie, papier, etc.) que spéculaires (métal, verre, etc.)



On a vu en cours de synthèse les algorithmes de calcul d'illumination de Lambert et de Phong

Mais il existe d'autres BRDF (Blinn, Ward, Cook-Torrence, etc.) plus réalistes ou permettant de représenter certaines surfaces particulières (tissu, cuir, matériaux anisotropiques, etc.)



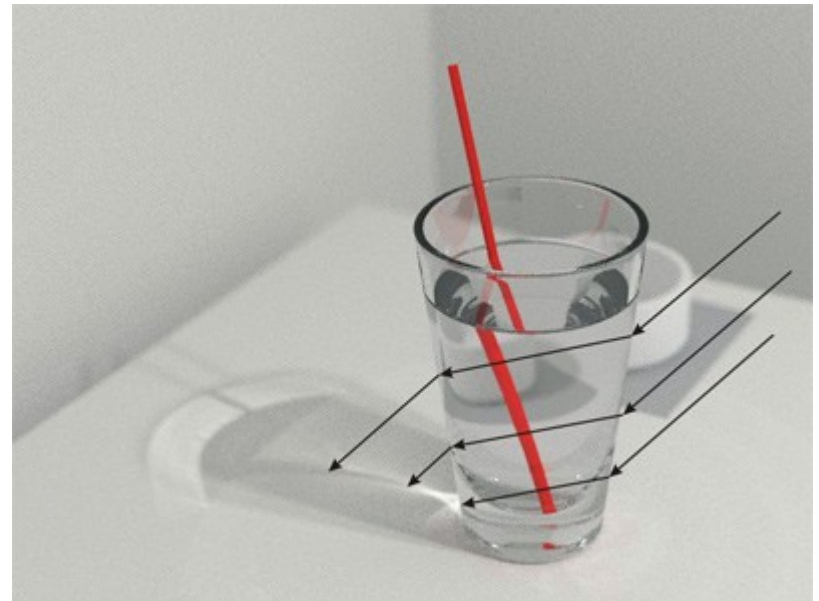
5. Réfraction de la lumière

5.1 Principe

Dans un milieu uniforme, la lumière se propage à une vitesse constante. Mais lorsqu'elle passe (transmission) d'un milieu transparent à un autre milieu transparent de densité différente (par exemple de l'air à l'eau), sa vitesse se modifie.

Ce changement de vitesse entraîne la déviation de la lumière.

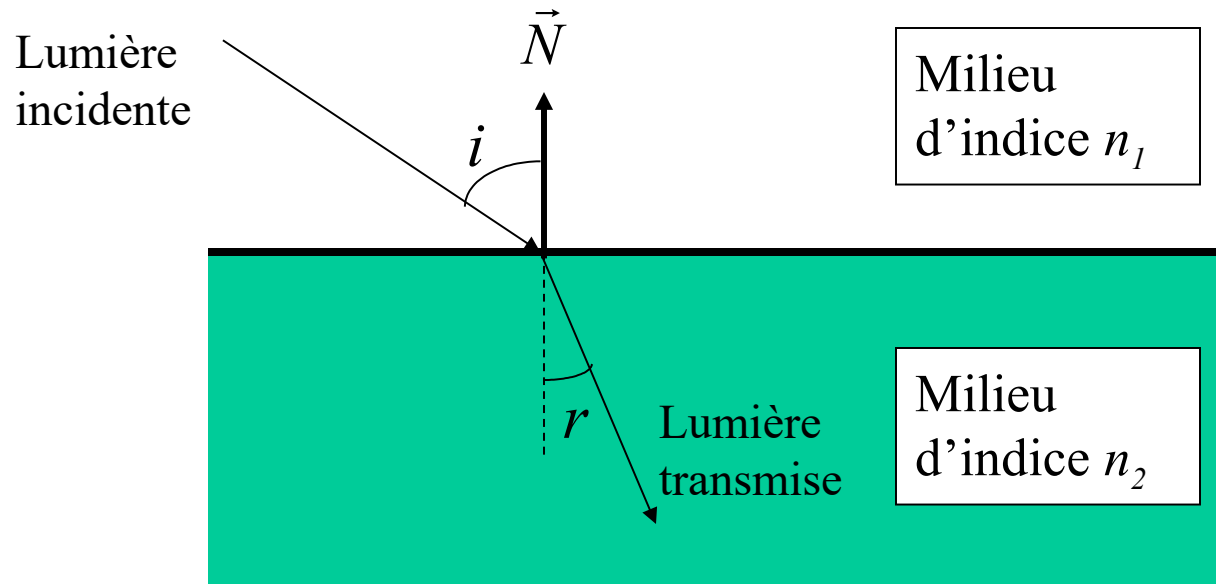
On parle de **réfraction** de la lumière transmise.



5.2 Loi de réfraction

L'angle de réfraction est lié à l'angle d'incidence par la **relation de Descartes - Snell** :

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r$$



5.3 Indice de réfraction

L'indice de réfraction d'un milieu correspond au rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur sa vitesse dans le milieu.

→ Plus l'indice de réfraction d'un milieu est grand et plus la vitesse de la lumière dans ce milieu est lente.

Exemple :

Vitesse de la lumière dans le vide : $V_1 = 300\,000 \text{ km/s}$

Vitesse de la lumière dans un diamant : $V_2 = 124\,000 \text{ km/s}$

→ Indice de réfraction du diamant : $V_1/V_2 = 2,42$

Quelques indices de réfraction :

Milieu	Indice
Vide	1
Air	1,00029
Eau	1,33
Plexiglas	1,51
Diamant	2,42

5.4 Condition de réfraction : réflexion totale

Réfringence : la réfringence d'un milieu transparent est donnée par son indice de réfraction. Un milieu d'indice n_1 est dit plus réfringent qu'un milieu d'indice n_2 si $n_1 > n_2$.

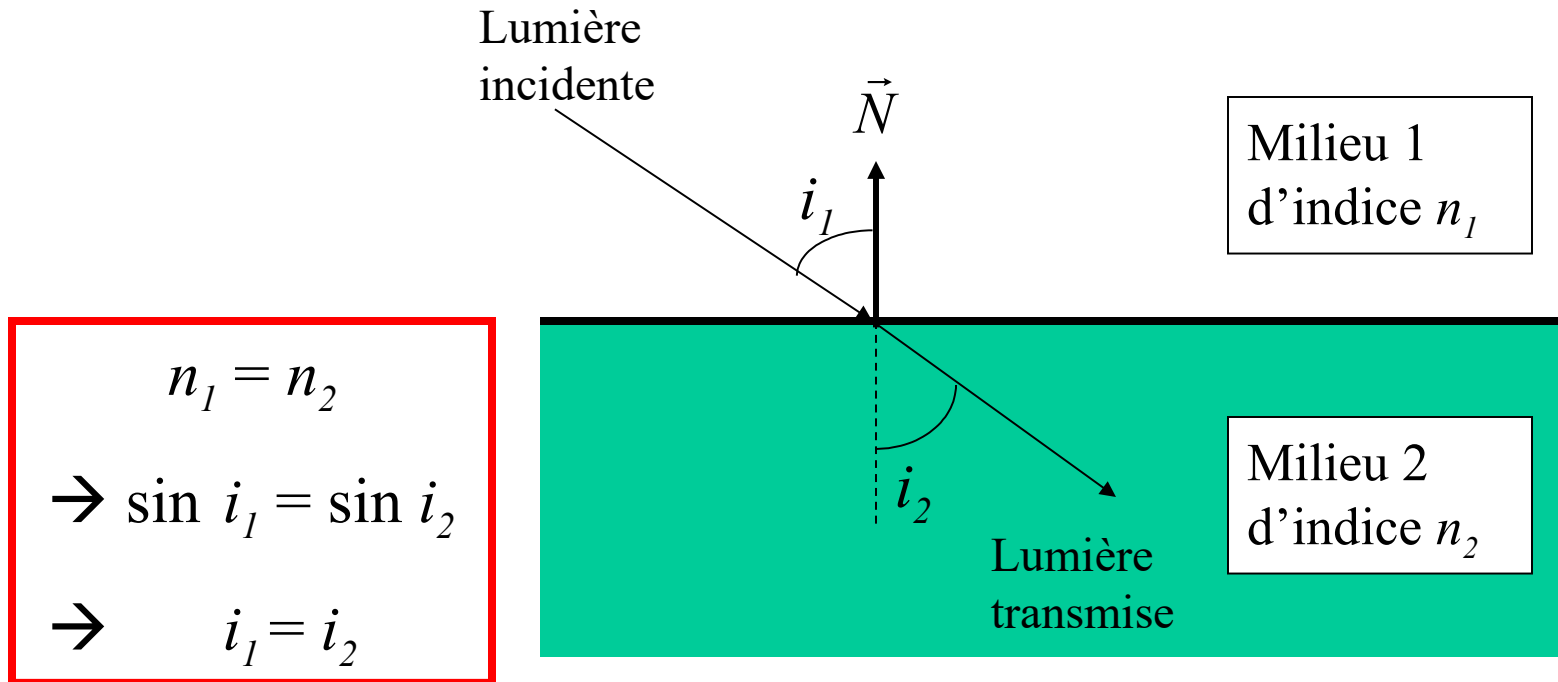
Lorsque la lumière change de milieu, 3 cas se présentent :

- a) La lumière rencontre un milieu d'indice identique
- b) La lumière rencontre un milieu plus réfringent
- c) La lumière rencontre un milieu moins réfringent

a) La lumière rencontre un milieu d'indice identique

Le rayon réfracté n'est pas dévié.

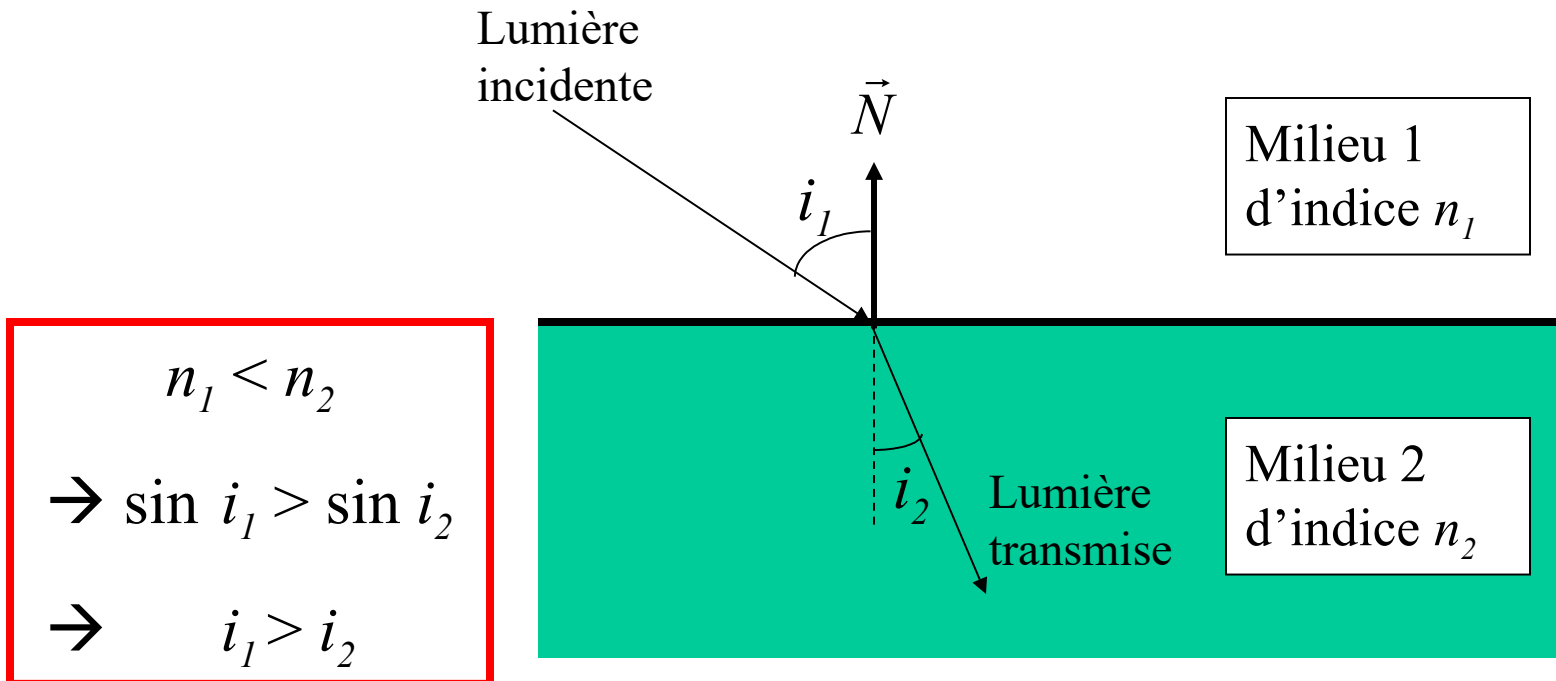
Une partie de la lumière est transmise du milieu 1 au milieu 2, quel que soit l'angle d'incidence i_1 .



b) La lumière rencontre un milieu plus réfringent

Le rayon réfracté se rapproche de la normale \vec{N} .

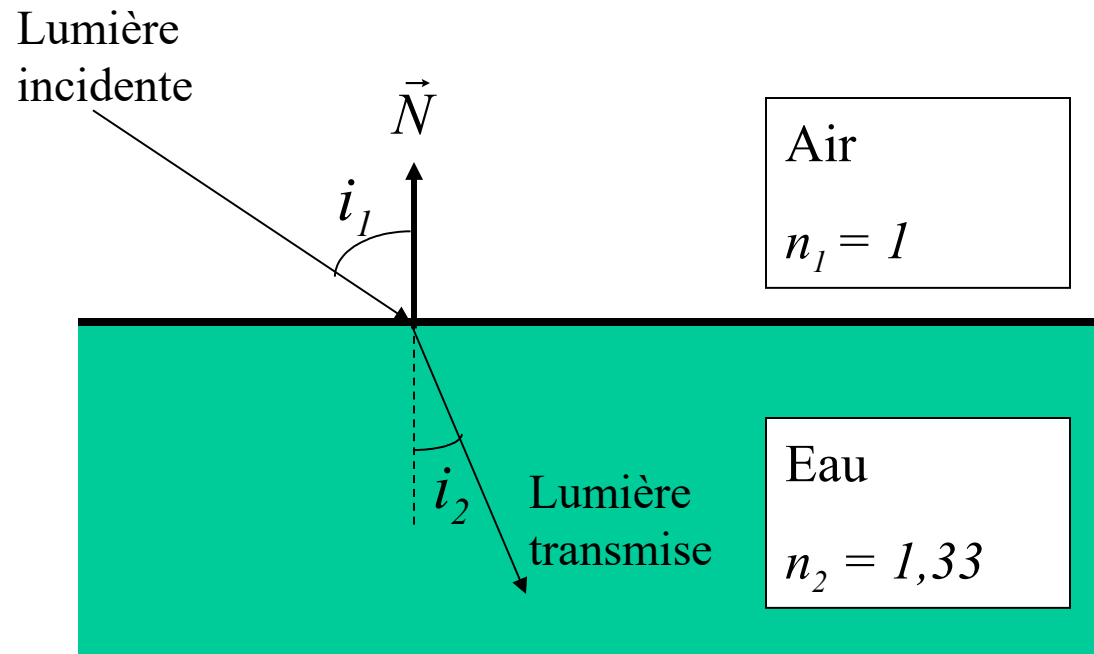
Une partie de la lumière est transmise du milieu 1 au milieu 2, quel que soit l'angle d'incidence i_1 .



Exemple : passage de la lumière de l'air à l'eau

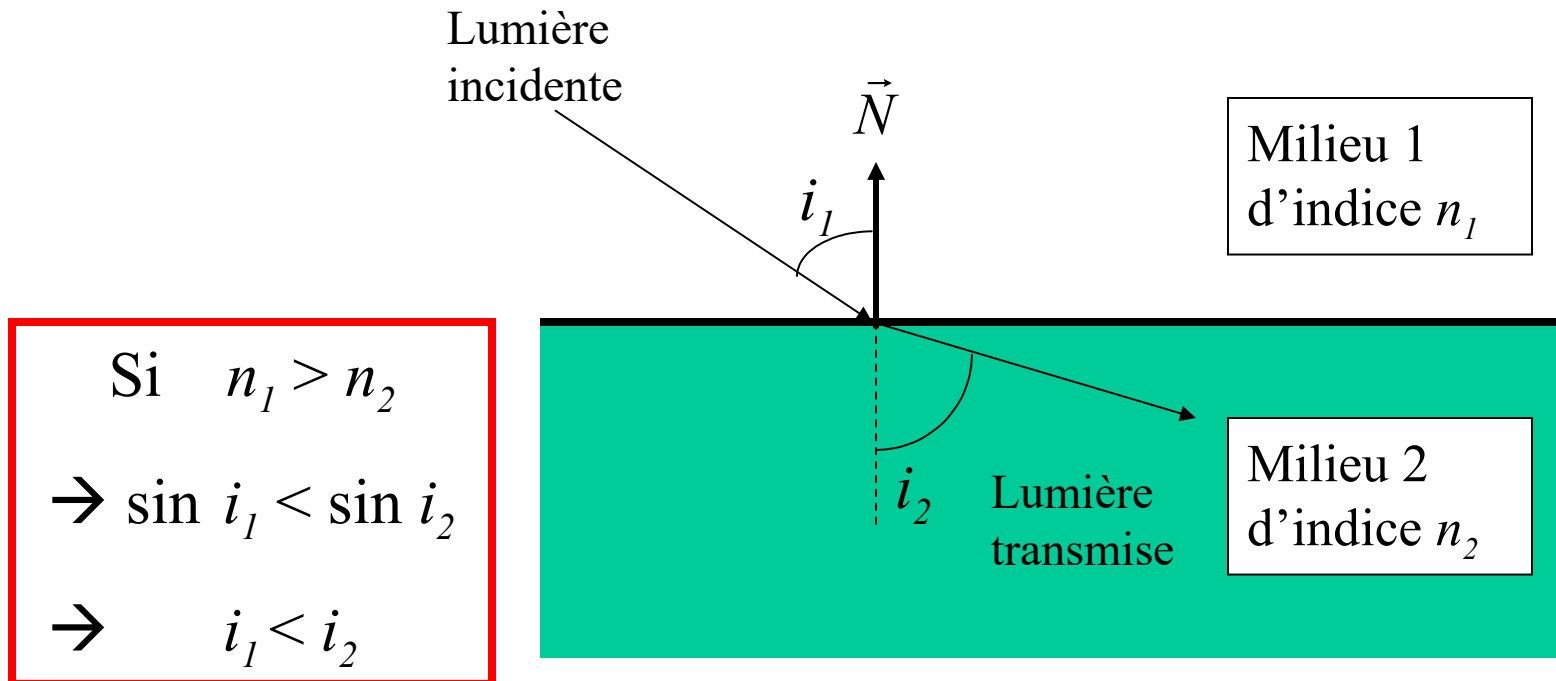
→ Une paille dans un verre d'eau apparaîtra brisée.

→ Les objets dans l'eau paraissent plus près de la surface à un observateur



c) La lumière rencontre un milieu moins réfringent

Le rayon réfracté s'écarte de la normale \vec{N} .

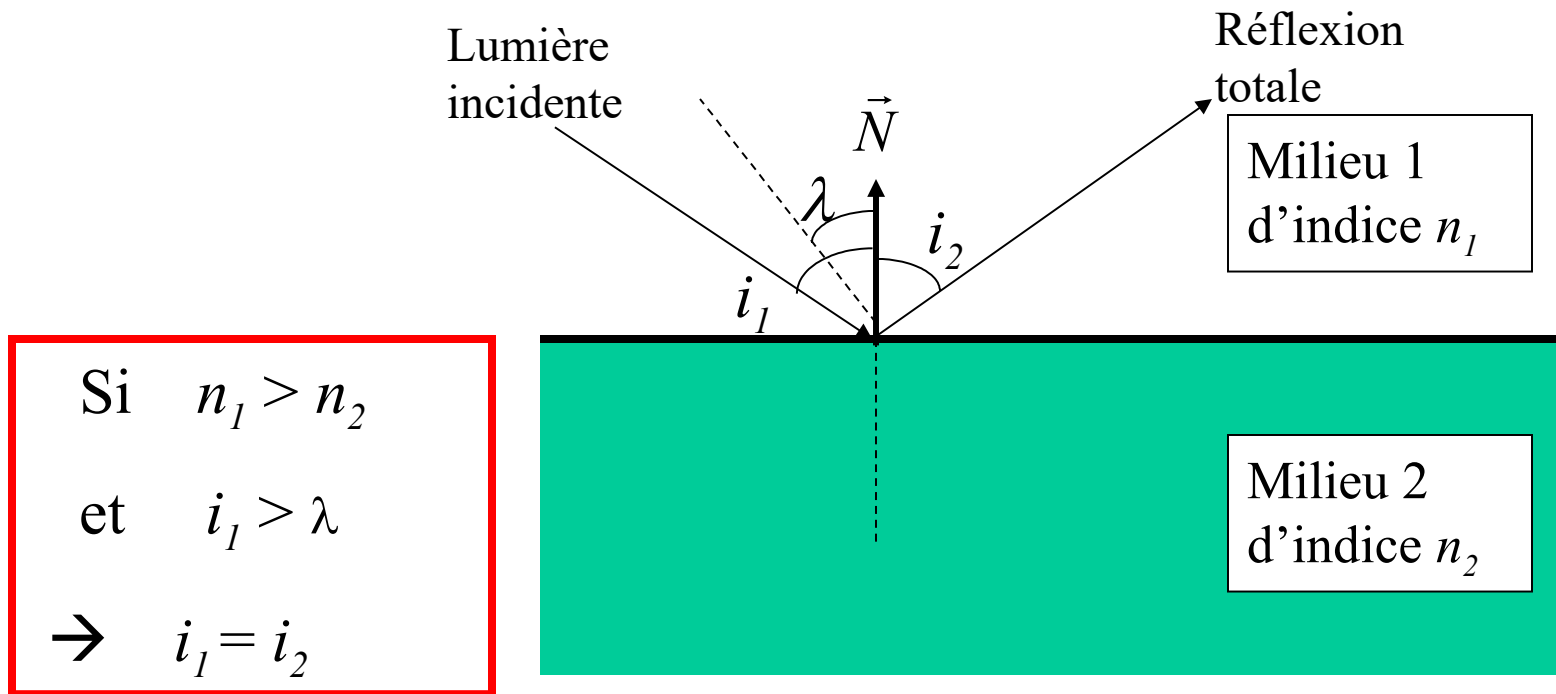


Quand $i_2 = 90^\circ$, alors $i_1 = \lambda$ tel que :

$$\sin \lambda = \frac{n_2}{n_1}$$

Et λ est appelé **l'angle limite**.

Si $i_1 > \lambda$, il n'existe plus de rayon réfracté, il y a **réflexion totale**.



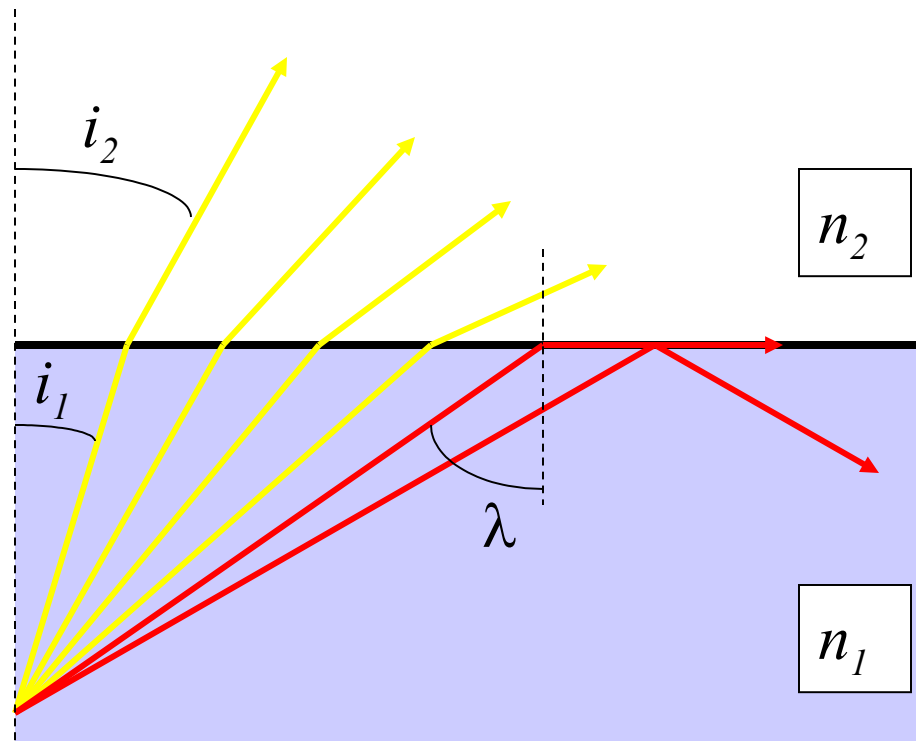
Quand $i_2 = 90^\circ$, alors $i_1 = \lambda$ tel que :

$$\sin \lambda = \frac{n_2}{n_1}$$

Et λ est appelé **l'angle limite**.

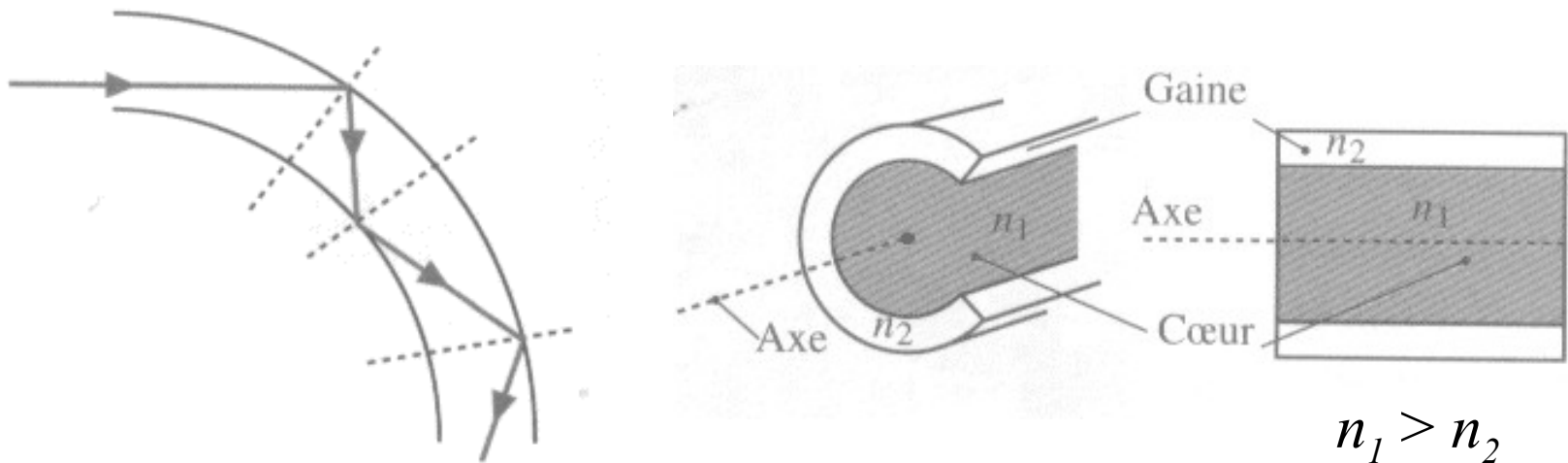
Si $i_1 > \lambda$, il n'existe plus de rayon réfracté, il y a **réflexion totale**.

Si $n_1 > n_2$
et $i_1 > \lambda$
 $\rightarrow i_1 = i_2$



Application de la réflexion totale

Les **fibres optiques** conduisent la lumière par une suite de réflexions totales. Elles sont constituées d'un cœur d'indice n_1 entouré d'une gaine moins réfringente d'indice n_2 .



Utilisation : télécommunication, audiovisuel, médical, éclairage, ...

6. Absorption

La part de la lumière incidente sur une surface qui n'est pas réfléchiée ou transmise (dans le cas de matériaux translucides) est absorbée.

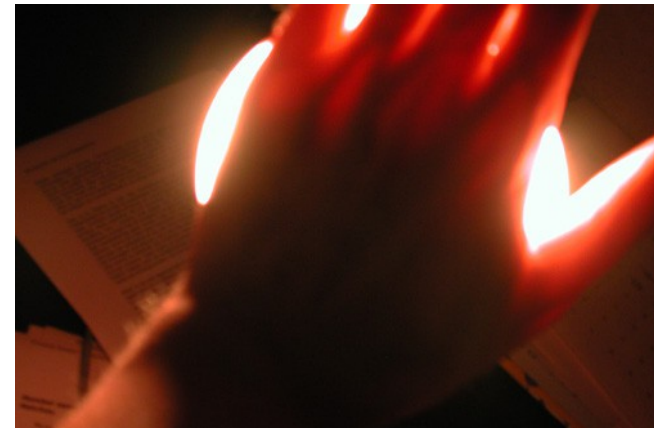
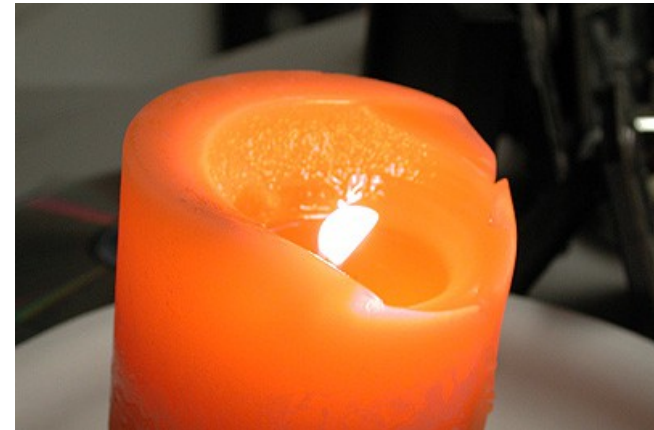
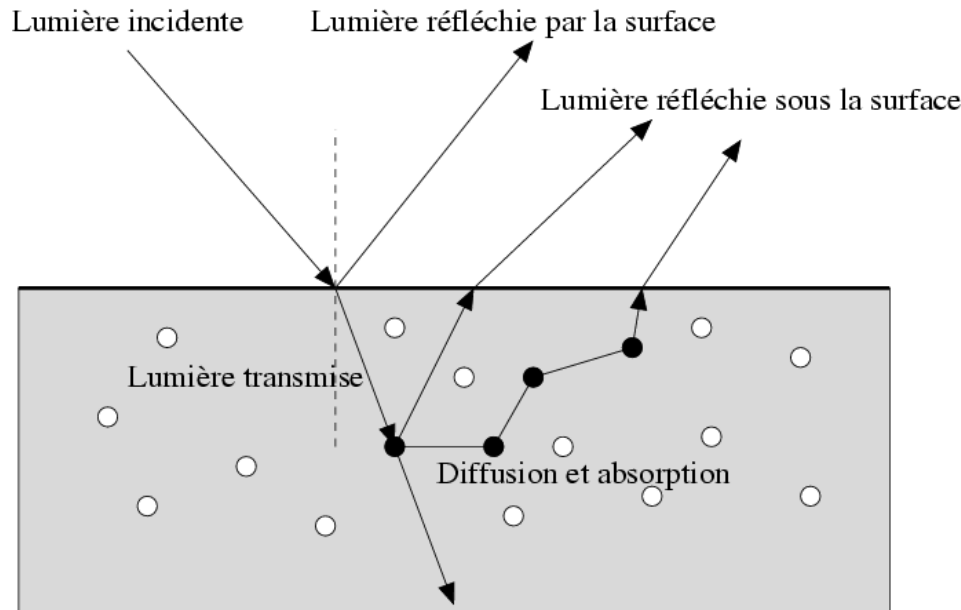
L'absorption correspond à la capture de photons par les électrons des atomes du matériau, qui se trouvent ainsi portés à des niveaux excités (mécanique quantique).

- échauffement de la matière.
- production d'un courant électrique (effet photoélectrique).

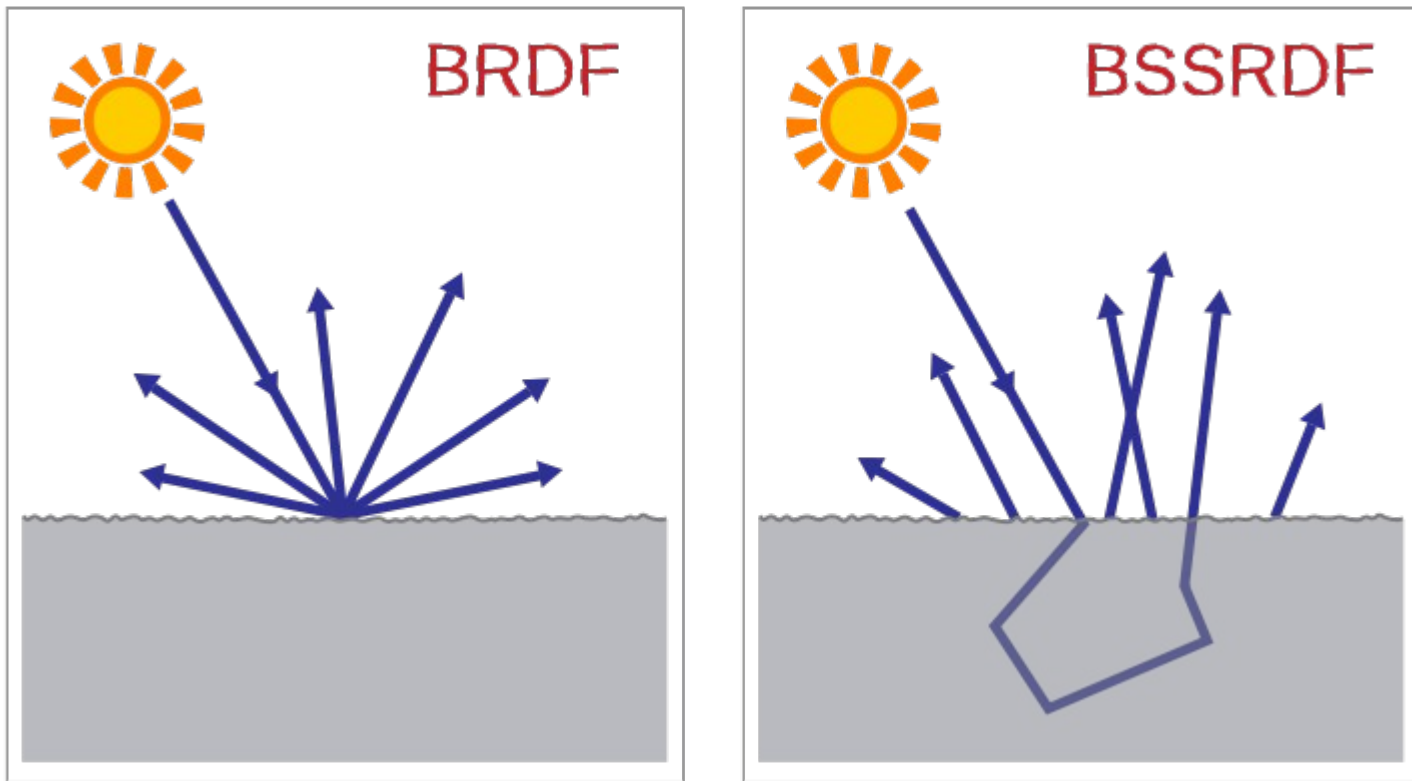
7. Réflexion sous la surface

« *Subsurface scattering* »

Dans le cas de matériaux translucides (peau, feuilles, minéraux, liquides, ...), la lumière transmise dans le matériau peut être diffusée (par des particules, des pigments, ...) et éventuellement être ré-émise à la surface.



La fonction qui permet de connaître les directions de réflexion de la lumière après un passage sous la surface en fonction de la lumière incidente est appelée une **BSSRDF** (*Bidirectional surface scattering reflectance distribution function*)



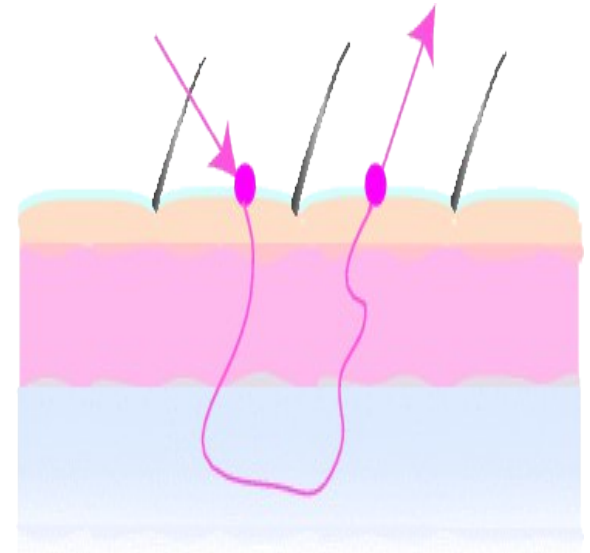
Il est indispensable d'utiliser une BSSRDF pour un rendu réaliste de la peau.



BRDF



BSSRDF



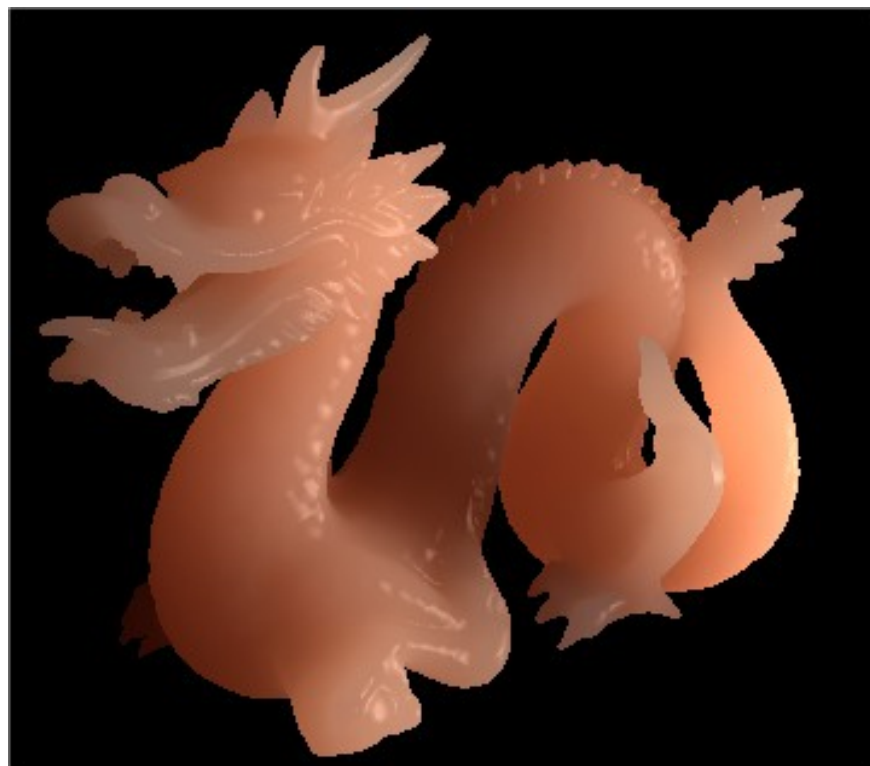
Light
Interacting
with Skin

Skin

Flesh

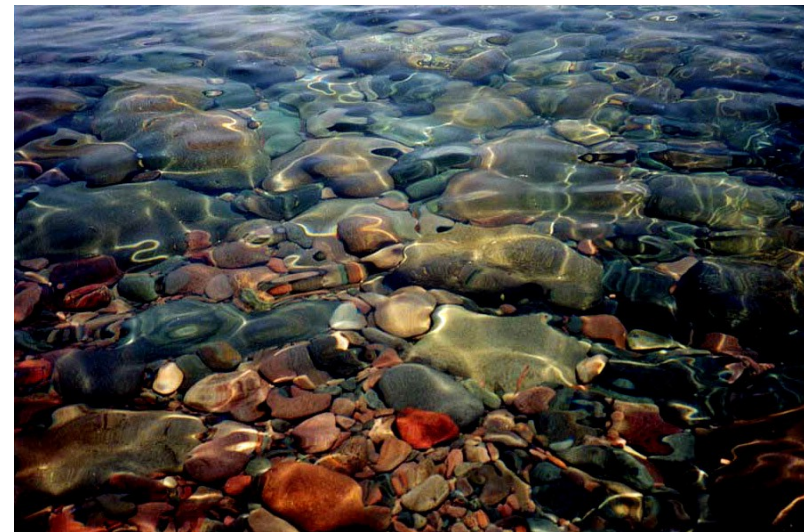
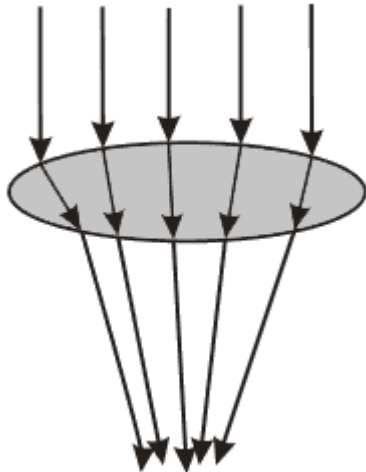
Bone

Photo by H.W.
Jensen of Stanford
University



8. Caustiques

Caustiques = motifs lumineux formés sur des surfaces diffuses par la concentration de rayons lumineux ayant été réfléchis ou transmis par des surfaces spéculaires.

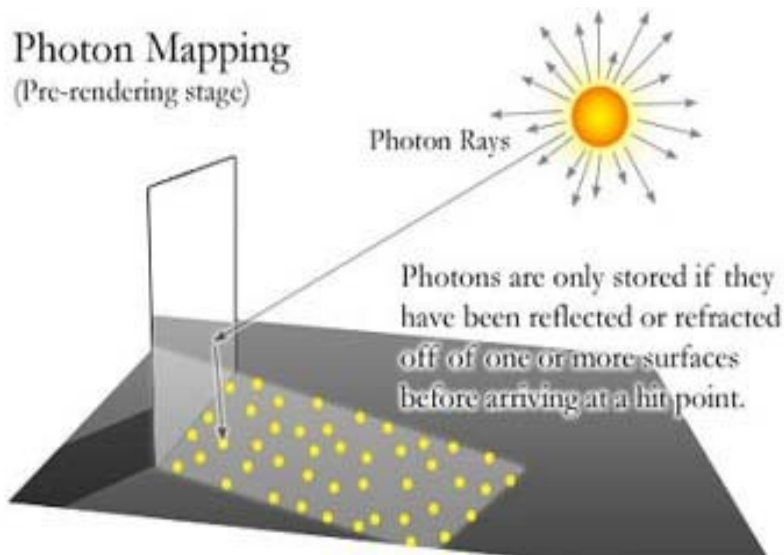


Représentation de caustiques en synthèse d'image :

1) Lancer de rayons (photon mapping)

Le calcul se fait en 2 passes :

- Des rayons émis depuis les sources lumineuses laissent des « photons » sur la surface d'objets au matériau diffus
- Lors du calcul d'illumination de la surface, on rajoute celle des photons.

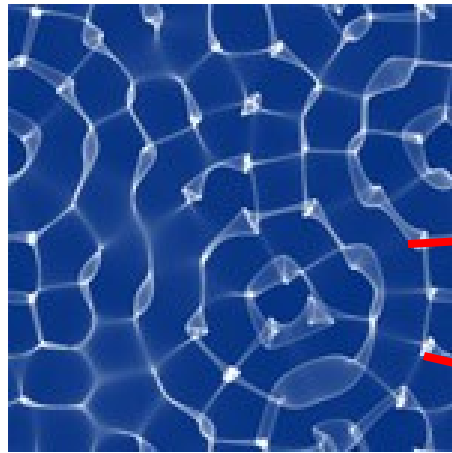


Très réaliste, mais coûteux en temps de calcul.

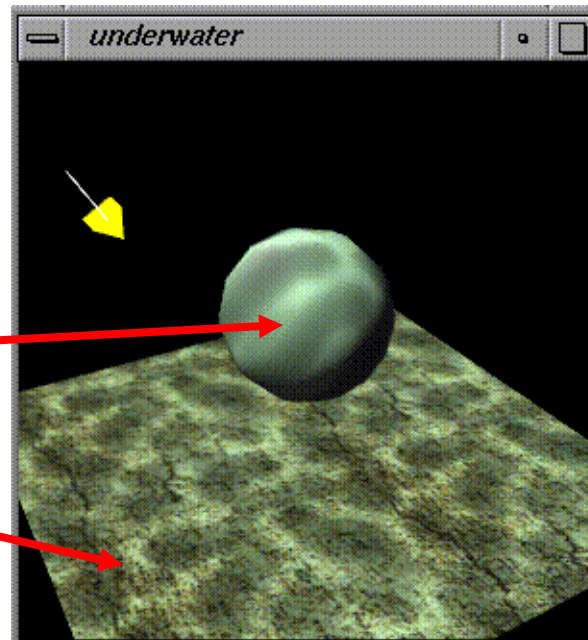
Représentation de caustiques en synthèse d'image :

2) Plaquage de textures de caustiques

On utilise une série de textures montrant une évolution du motif de caustiques au cours du temps.



Texture

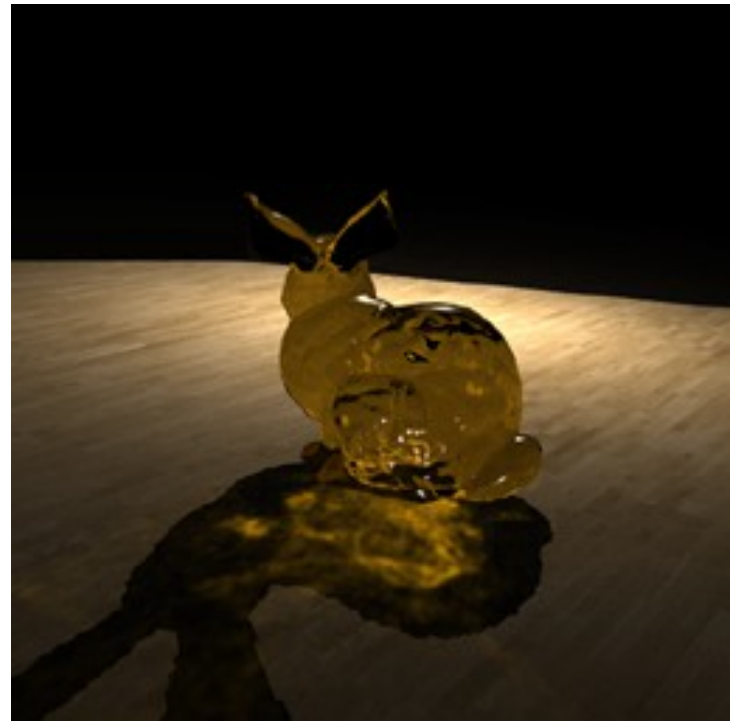
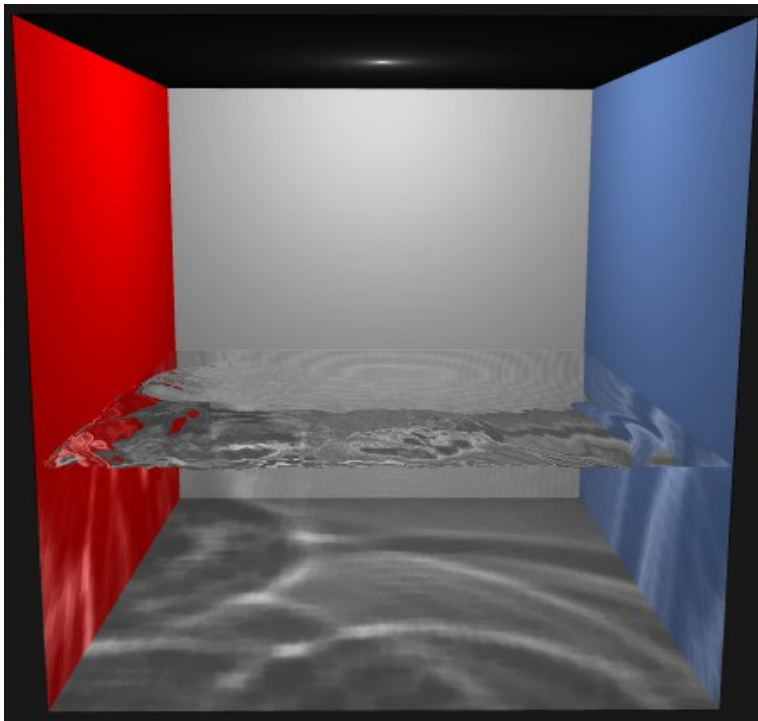


Très rapide, mais peu réaliste (motif répétitif, précalculé donc sans grand rapport avec l'illumination réelle)

Représentation de caustiques en synthèse d'image :

3) Calcul au moyen d'un Shader

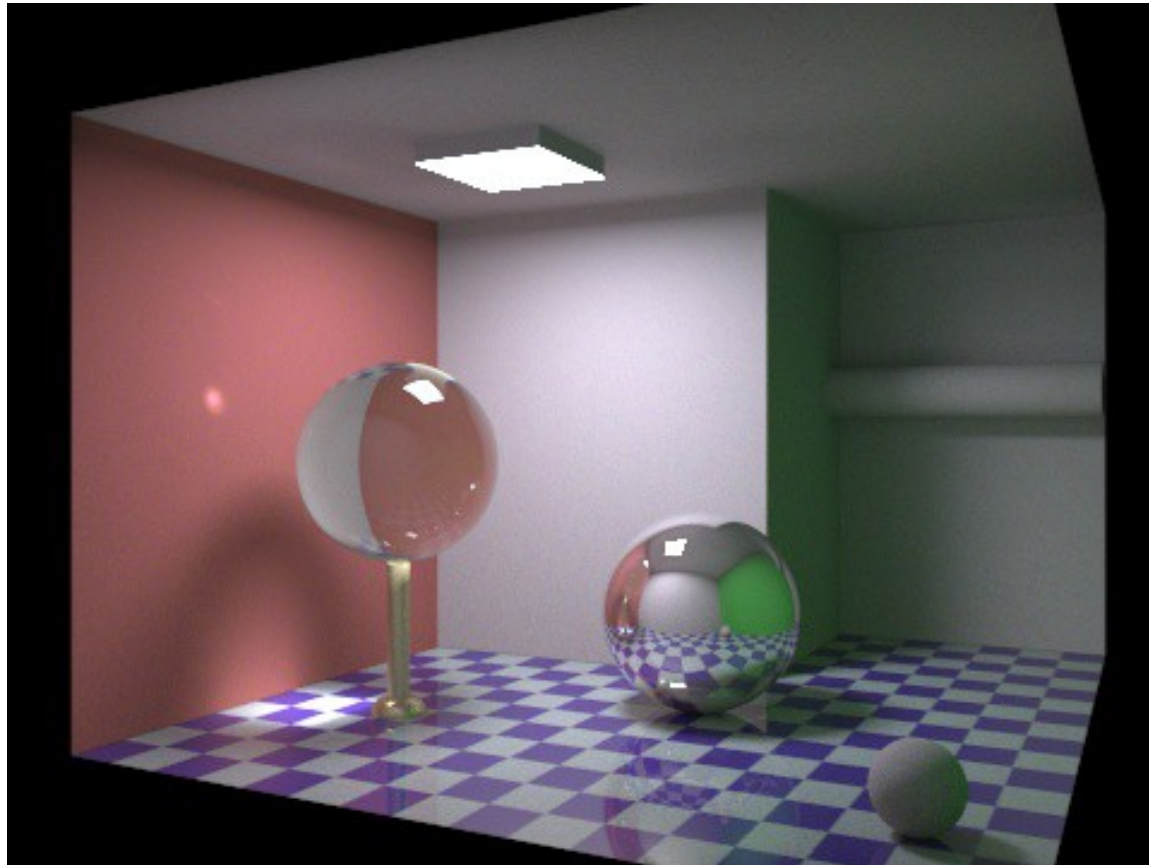
<http://graphics.cs.ucf.edu/caustics/>

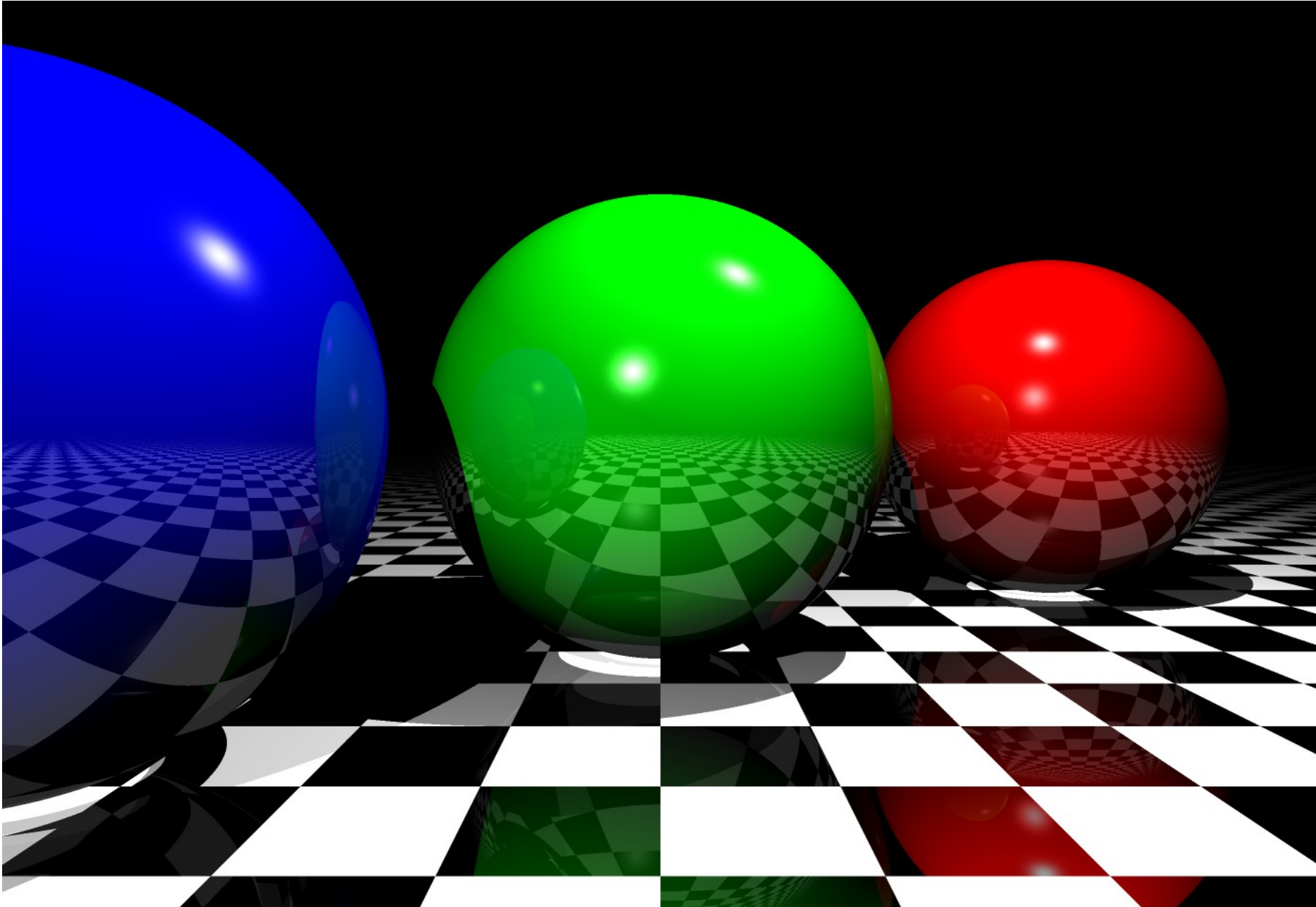


Solution temps réel, compromis entre rapidité et réalisme (tout dépend du calcul fait dans le shader).

9. Utilisation de l'optique géométrique : le lancer de rayons

La méthode de « lancer de rayons » (« *raytracing* ») permet d'obtenir des images de synthèse très réalistes car elle repose sur les lois de l'optique géométrique (réflexion, réfraction) pour obtenir facilement des reflets ou des transparences.







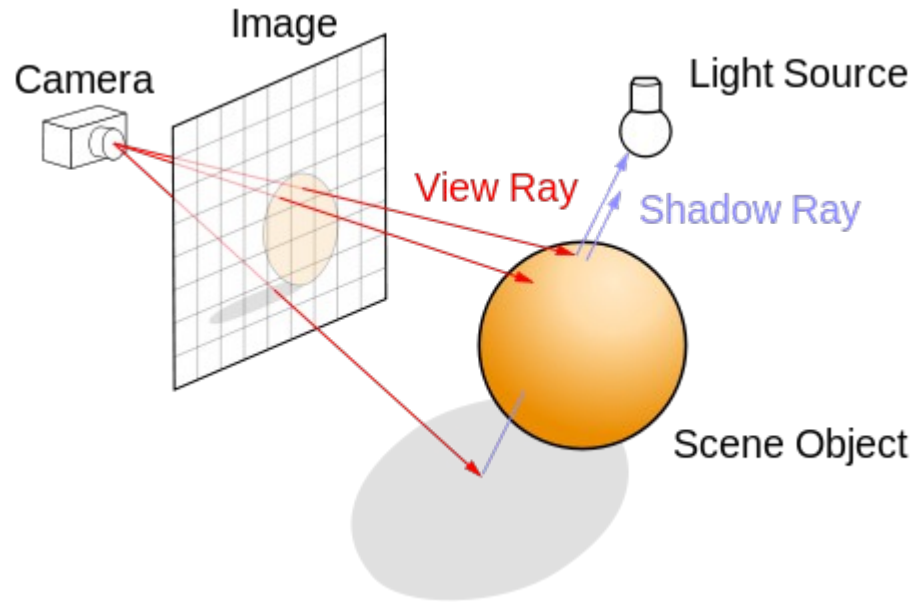
Il s'agit cependant d'une méthode coûteuse en temps de calculs, qui ne permet pas d'obtenir des images en temps réel à moins d'utiliser le GPU pour effectuer les calculs.

Les temps de calcul dépendent principalement du nombre de pixels de l'image et de la complexité de la scène.

Pour chaque pixel de l'image :

- Créer le rayon qui va de l'œil à ce pixel
- Lance le rayon dans la scène (récursif)
- Couleur du pixel = couleur de l'objet touché par le rayon

Algorithme du lancer de rayons

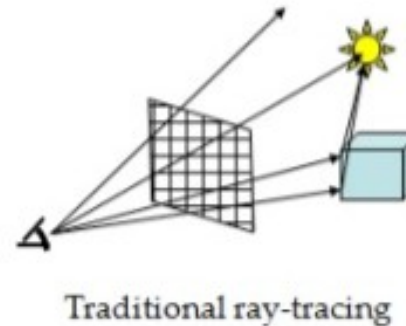
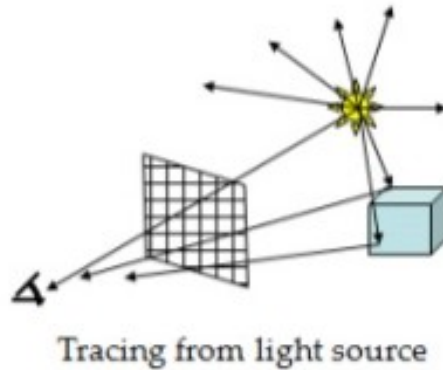


Pour chaque pixel de l'image :

- Créer le rayon qui va de l'œil à ce pixel
- Lance le rayon dans la scène (récursif)
- Couleur du pixel = couleur de l'objet touché par le rayon

Algorithme du lancer de rayons

On effectue en fait l'inverse de ce qui se passe dans la réalité !
Mais si on lançait les rayons à partir de la source de lumière, on en lancerait beaucoup qui ne parviendraient jamais jusqu'à l'oeil.
Le lancer de rayons traditionnel assure qu'on calcule une couleur pour chaque pixel, sans lancer de rayons inutiles.



Pour chaque pixel de l'image :

- Créer le rayon qui va de l'œil à ce pixel
- Lance le rayon dans la scène (récursif)
- Couleur du pixel = couleur de l'objet touché par le rayon

Algorithme du lancer de rayons

Lance le rayon dans la scène :

- Trouver le point d'intersection du premier objet touché
- Calculer la couleur C en ce point :
 - Point d'intersection visible d'une source lumineuse ?
 - Oui : calculer C selon l'influence de la source
 - Non : $C = \text{couleur ambiante}$
 - Si l'objet est réfléchissant, créer le rayon réfléchi, et appeler récursivement la fonction **Lance le rayon** pour avoir la couleur C_R
 - Si l'objet est translucide, créer le rayon transmis, et appeler récursivement la fonction **Lance le rayon** pour avoir la couleur C_T
- Retourner la couleur $C + C_R + C_T$

Algorithme de la fonction récursive de lancer d'un rayon dans la scène

Logiciels de lancer de rayon :

POV-Ray (Persistence of Vision Raytracer)

Open source

<http://www.povray.org/>

Mental Ray

Commercial (Nvidia), utilisé dans 3D Studio

<http://www.mentalimages.com/index.php>

YafaRay

Open source, utilisé dans Blender

<http://www.yafaray.org/>

Il y a eu de très nombreuses améliorations et optimisations de l'algorithme de raytracing. Il est maintenant possible d'obtenir des images en temps réel en utilisant le GPU (Graphical Processor Unit) de la carte graphique.



Il y a eu de très nombreuses améliorations et optimisations de l'algorithme de raytracing. Il est maintenant possible d'obtenir des images en temps réel en utilisant le GPU (Graphical Processor Unit) de la carte graphique.



<https://www.shadertoy.com/view/ld3Gz2>