

COURS de TRAITEMENT D'IMAGES



A0=		Online						
	A	B	C	D	E	F	G	H
0	Image							
1			Feature	Results/mm				
2	QIRUN	MEASURE INNER RADIUS	RAD 1					
3		MEASURE OUTER RADIUS	RAD 2					
4		MEASURE DIA 1	DIA 1					
5		MEASURE DIA 2	DIA 2					
6								
7								
8								
9			Row	Col	Angle	Scale	Score	
10	QPatterns	0.000	234.115	294.289	0.124	100.000	99.974	
11		CentRow	CentCol	StartRow	StartCol	EndRow	EndCol	Ra
12	QEdges	266.563	141.930	299.406	168.808	104.220	139.771	1
13		CentRow	CentCol	Radius	Score			
14	QEdges	214.125	296.906	16.188	60.622			
15	QEdges	272.680	298.906	105.261	36.144			
16								
17								
18								
19								
20								

Pierre BONNET

Pour aborder le traitement d'images, il est important de préciser la ou les grandeurs caractéristiques qui donnent naissance à la notion d'image. L'image se forme sur un capteur qui la retranscrit en un signal utilisable par le système de traitement. Ce signal est donc la traduction de l'énergie physique reçue au travers de son système optique.

FORMATION PHYSIQUE DE L'IMAGE

On peut distinguer trois cas usuels de formation d'une image:

- création **directe** de l'image d'une source lumineuse dite primaire sur la surface du capteur, l'énergie étant apportée par la source. C'est le cas de l'observation des étoiles ou du soleil au travers d'un télescope, d'une image thermographique (rayonnement infra-rouge). L'image est la représentation directe de l'énergie de la source.

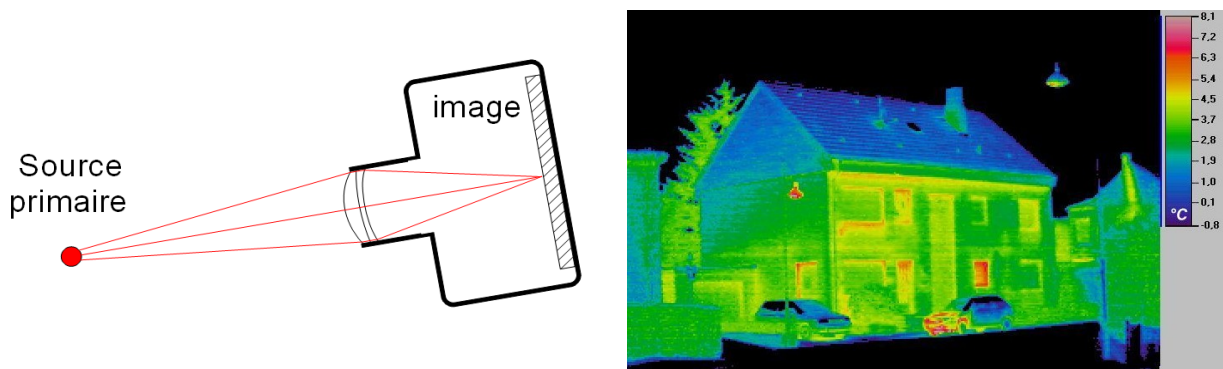


fig 1 - Image de source primaire émissive

- création de l'image de l'énergie **réfléchi**e par un objet. C'est le cas plus courant d'utilisation de la notion d'image. L'énergie photonique est fournie par une source primaire; elle est réfléchiée par l'objet qui joue alors le rôle d'une source secondaire. Le contenu de l'image est le résultat de la composition des facteurs caractéristiques de la source et de l'objet.

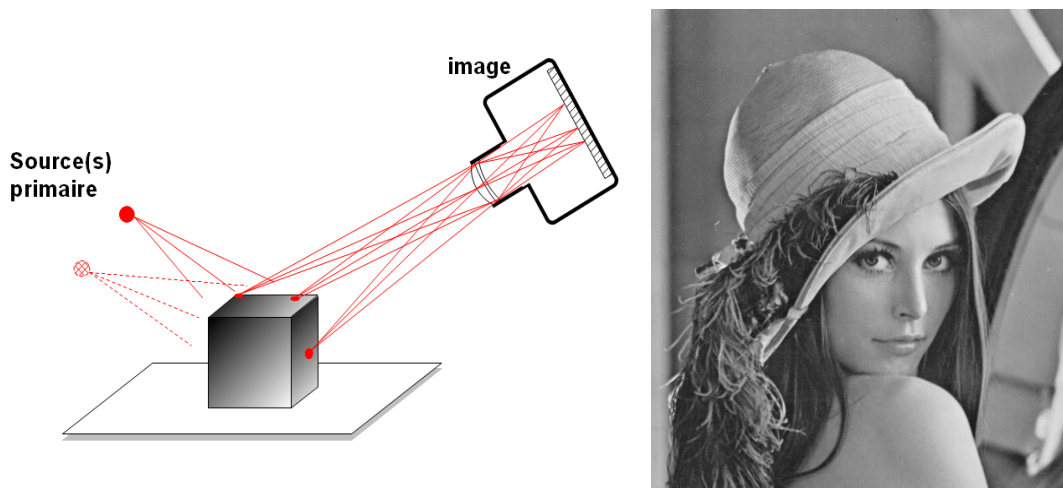


fig 2 - Image de réflexion

- création de l'image par **transmission**. Comme dans le cas précédent, les caractéristiques de la source et de l'objet interviennent dans la formation de l'image. La création d'images par transparence se rencontre généralement dans les problèmes de contrôle de matériaux transparents (verre, plastiques...)

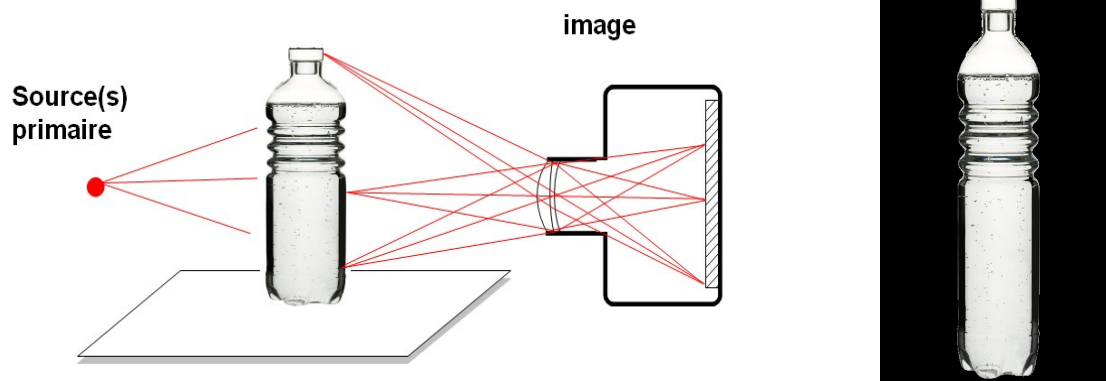


fig 3 - Image par transmission

Projection

Dans les trois cas, on remarque que l'image est le résultat de la **projection** des rayons lumineux issus de la source ou de l'objet sur la *surface* sensible du capteur. L'étude qui suit vise à préciser la notion d'image que le capteur traduit en signal électrique ainsi que quelques aspects géométriques liés à la fonction de projection.

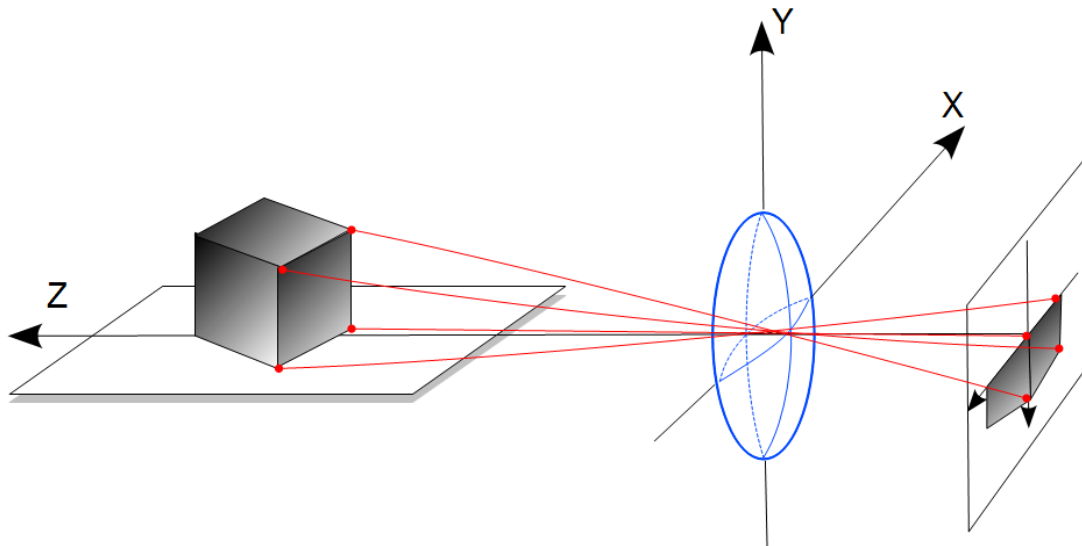


fig 4 - Projection 3D-->2D

La projection de l'univers 3D sur la surface sensible du capteur (plane ou non) induit une perte irréversible de la notion de *profondeur* (distance à l'appareil selon l'axe principal optique).

L'image obtenue n'est pas la réalité du monde 3D. Cependant, la *connaissance à priori* du type de scène (éventuellement obtenue par analyse de la scène et reconnaissance partielle des éléments) permet de reconstruire partiellement la dimension perdue par projection..

Définition d'une image

L'image est avant tout le *signal* fourni par le capteur photosensible. Nous pouvons donner une première définition de l'image à partir de ce signal.

On appelle image un domaine bidimensionnel fini D dont chaque point est caractérisé par la valeur d'une fonction positive bornée appelée *niveau de gris*.

C'est une application bidimensionnelle de R^2 dans R qui à tout point A fait correspondre $I(A)$ avec:

$$0 < I(A) < M \quad \forall A \in D$$

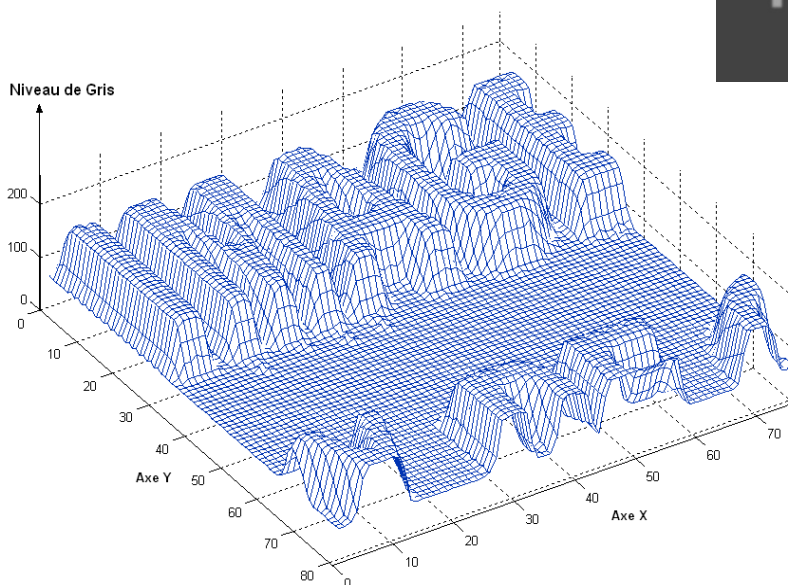
I représente le plus souvent la luminance [appelée à tort intensité dans de nombreux ouvrages] d'une image. Ces notions seront développées ultérieurement

Le domaine D est le plus souvent plan; dans les autres cas (cylindrique ou sphérique par exemple), on peut toujours ramener le domaine bidimensionnel à un domaine D' plan par transformation géométrique.

La représentation d'une image est le plus souvent sous forme de vue photographique, c'est à dire que le niveau de gris de chaque point est transcrit en niveau d'encre.



fig 5 - Représentation photographique et 3D d'une image



Cette fonction peut être représentée par une *surface* dans un espace à trois dimensions, le niveau de gris étant porté en ordonnée; les propriétés de cette surface peuvent être mises en évidence par certains opérateurs dits de voisinage, en particulier les opérateurs linéaires et les opérateurs *morphologiques*.

L'analyse qui suit a pour but de préciser la grandeur caractéristique de la notion de **niveau de gris de l'image**, en suivant le trajet des rayons lumineux de la source lumineuse jusqu'au capteur ; l'exposé sera fait en supposant que l'image est obtenue par réflexion, ce qui est le cas le plus courant dans les applications industrielles.

L'ENERGIE LUMINEUSE

L'images de réflexion, la plus courante, est le résultat du triplet source-objet- capteur:

- la source primaire fournit l'énergie lumineuse sous forme d'un rayonnement électromagnétique qui est intercepté par les surfaces réfléchissantes de l'objet
- l'énergie réfléchie est partiellement captée par le système optique du système photosensible, qui le transforme en signal par conversion photoélectrique.

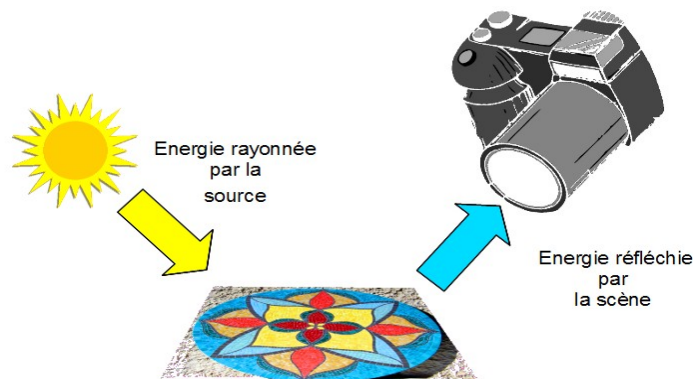


fig 6 - Energie en réflexion

Flux rayonné par une source

Le flux lumineux d'une source est l'énergie rayonnée dans toutes les directions de l'espace. Elle peut s'évaluer à partir de plusieurs grandeurs suivant le domaine précis d'application:

- **l'énergie primaire**, utilisée pour créer l'énergie lumineuse (électrique ou autre). Le flux lumineux résultant dépend du principe physique de la source (filament, tube à décharge...); il est déterminé par son *rendement*. Cette unité est utilisée dans le domaine grand public pour caractériser les sources usuelles (tubes fluorescents, lampes à incandescence...)

l'énergie primaire s'exprime en *watt*.

- le **flux énergétique total** Φ exprimé en *watt lumineux*. Pour une source quelconque, cette énergie est répartie dans un *spectre de rayonnement*. Le flux énergétique comprend éventuellement des longueurs d'onde qui ne participent pas à la formation de l'image. Il en résulte que pour une source S_1 de flux énergétique Φ_1 supérieur au flux Φ_2 d'une source S_2 , la sensation lumineuse *perçue* sur le capteur n'est pas forcément plus grande.

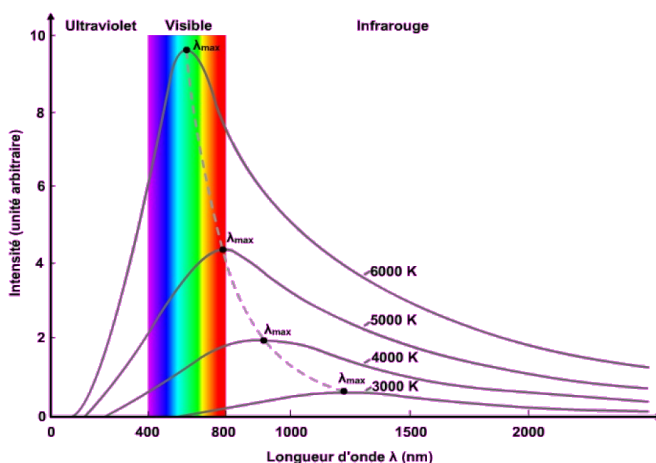
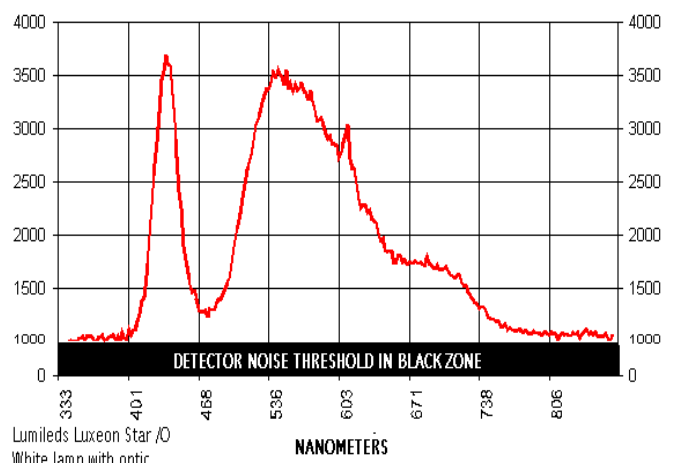


fig 7 - Spectre du corps noir et d'une source type LED blanche



- le **flux lumineux** tenant compte de la sensibilité du capteur (l'oeil humain sert de capteur de référence). Cette sensibilité étant variable selon la longueur d'onde perçue, l'efficacité lumineuse est liée au flux énergétique par le facteur de sensibilité du récepteur de lumière.

a) cas d'une source monochromatique:

soit $F(\lambda_0)$ la fonction de sensibilité de l'oeil ou du capteur pour la longueur d'onde λ_0 de la source. Le flux lumineux résultant est:

$$\underbrace{\Phi_{\text{lumineux}}(\lambda_0)}_{\text{lumen}} = \beta \cdot F(\lambda_0) \cdot \underbrace{\Phi_{\text{énergétique}}(\lambda_0)}_{\text{watt}}$$

Le coefficient β a été fixé expérimentalement par la commission de l'éclairage C.I.E. Sa valeur actuelle est $\beta = 680$.

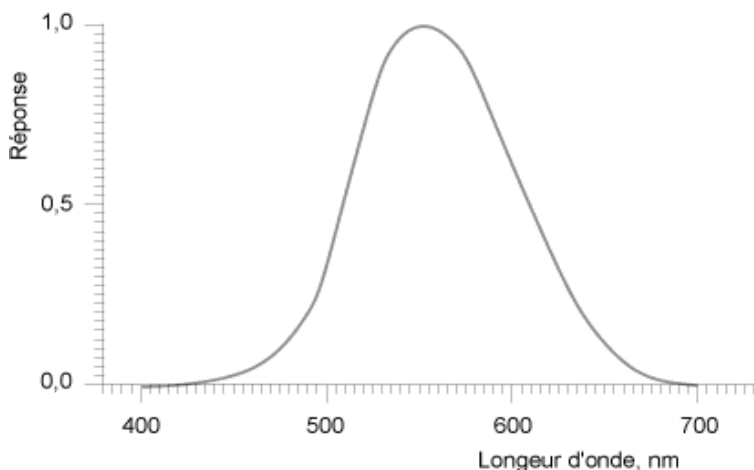


fig 8 - Sensibilité spectrale de l'oeil selon CIE

b) cas d'une source à spectre continu

Les sources usuelles rayonnent selon

On définit le flux énergétique par unité de longueur d'onde. Il s'exprime sous forme d'une densité spectrale de flux énergétique S_{Φ_e} (en watt/mètre) avec

$$S_{\Phi_e} = d\Phi_e / d\lambda$$

Le flux lumineux résultant est alors:

$$\Phi_{\text{lumineux total}} = \int_{\text{spectre utile}} \beta \cdot F(\lambda) \cdot S_{\Phi_e} \cdot d\lambda$$

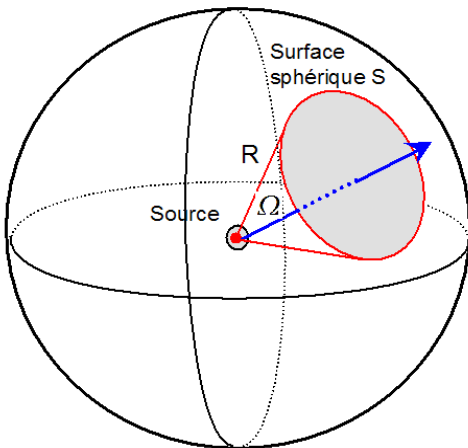
Le signal reçu par le capteur dépend donc à la fois du spectre de la source et de sa propre fonction de sensibilité spectrale.

Suivant le phénomène à étudier, on retient diverses longueurs d'onde de travail:

- 0.4 - 0.8 μm correspond au domaine visible. Dans de nombreux cas, la chaîne de traitement utilise la même bande spectrale, avec une fonction de sensibilité voisine de celle de l'oeil
- au delà de 0.8 μm et jusque dans la bande dite infrarouge pour l'étude des phénomènes liés à la température.
- la bande ultra-violet pour l'étude de la couche nuageuse terrestre par exemple.
- la bande X pour l'étude des structures métalliques ou minérales.

Intensité du rayonnement d'une source

L'intensité de la source caractérise l'énergie rayonnée dans une direction particulière de l'espace.



On définit l'angle solide Ω dans lequel est rayonné l'énergie d'une source S par le rapport entre la surface de la portion de sphère de centre S à son rayon R .

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

Il s'exprime en stéradians (une sphère complète représente un angle solide de 4π stéradians).

Fig 9 - Flux lumineux dans une direction

L'intensité I est la quantité d'énergie par unité d'angle solide dans une direction donnée:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \text{ unité } \textit{candela}$$

L'unité de mesure de l'intensité est le *Watt/stéradian* pour les unités énergétiques ou le lumen/stéradian appelé *candela* si le flux est exprimé en unités lumineuses.

Pour une source non monochromatique, on exprime éventuellement l'intensité en fonction de la longueur d'onde du rayonnement (intensité *spectrique*). Lorsqu'une source ne rayonne pas uniformément dans tout l'espace, ce qui est le cas général, on caractérise l'intensité émise dans les diverses directions par un *diagramme de rayonnement*. L'intensité totale de la source se retrouve par intégration sur la sphère complète:

$$\Phi_{total} = \int_{4\pi} I(\Omega) \cdot d\Omega$$

Pour les applications courantes de traitement d'images où la source éclaire les objets d'une scène, on utilise de préférence des sources à diagramme uniforme. L'isotropie du rayonnement s'obtient de deux façons:

- par une source ponctuelle (lampe halogène basse tension) placée à distance relativement grande de la scène.
- par une multiplication du nombre de source dans l'espace en faisant appel à une source déjà uniforme (tube fluorescent par exemple).

Ces deux types de sources ne sont pas équivalentes vis d'autres paramètres optiques tels que la *luminance* qui sera définie ultérieurement ou la *directionnalité* de l'éclairage. Remarquer que l'utilisation de quelques sources ponctuelles type spot donne de très mauvais résultats (intensité non constante et présence de directions préférentielles dans l'éclairage).

Eclairement d'une surface ou irradiance

On considère maintenant qu'une source de lumière éclaire une surface plane. Soit α l'angle entre la normale N à la surface et la direction moyenne du faisceau.

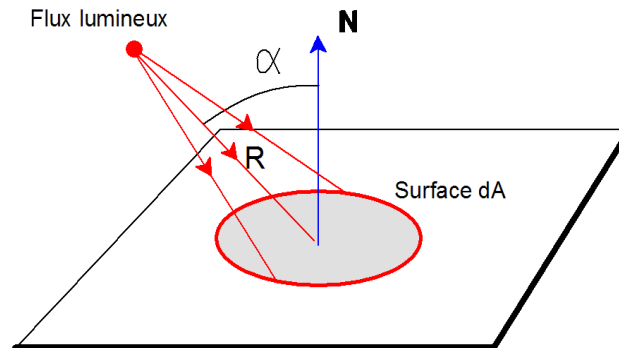


Fig 10 - Eclairement d'une surface

L'éclairement E est la quantité de lumière reçue par unité de surface.

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

L'unité d'éclairement est le **Watt/m²** en grandeur énergétique ou le **Lumen/m²** en grandeur lumineuse; le Lumen/m² est appelé **Lux**.

L'éclairement s'exprime à partir de l'intensité dans la direction α considérée en reprenant la définition du flux lumineux issu d'une source S :

$$d\Phi = I \cdot d\Omega = I \frac{dA \cdot \cos \alpha}{R^2}$$

d'où l'expression de l'éclairement:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = I \cdot \frac{dA \cos \alpha}{R^2 dA} = \frac{I \cos \alpha}{R^2}$$

On remarque que l'éclairement est fonction de l'angle d'incidence des rayons de la source. En particulier, pour $\alpha = \pi/2$, l'éclairement devient nul (incidence rasante) pour une source d'intensité I donnée. L'éclairement décroît avec le carré de la distance source-objet.

Les valeurs usuelles d'éclairement de notre univers sont les suivantes:

- de l'ordre de 0.01 à 0.1 lux pour le clair de lune
- quelques lux pour un éclairage fourni par une bougie
- de 100 à 1000 lux pour un éclairage artificiel du type bureau
- 10 000 à 100 000 lux pour le plein soleil (de l'ordre du kW/m²)

On remarque que l'oeil humain s'adapte à une très grande fourchette de valeurs lumineuses, grâce à la double structure sensible (cônes et bâtonnets) et à l'iris pour limiter les forts éclaircissements. La dynamique totale des éclaircissements usuels, de l'ordre de 10^6 , dépasse très largement celle de nombreux outils de l'électronique (capteurs, amplificateurs...) ou des signaux numérisés (entiers sur 16 bits par exemple). L'outil de formation de l'image sera donc spécialisé dans une gamme d'énergie plus restreinte de l'ordre de 1 à 10^2 (photo jpeg) ou 10^3 (appareil photo en mode raw).

Luminance ou radiance

Tout objet lumineux se comporte comme une surface émettant de lumière, qu'il soit une source primaire ou secondaire. La luminance caractérise la quantité de lumière rayonnée (renvoyée dans le cas d'une réflexion) par chaque élément de la surface de l'objet.

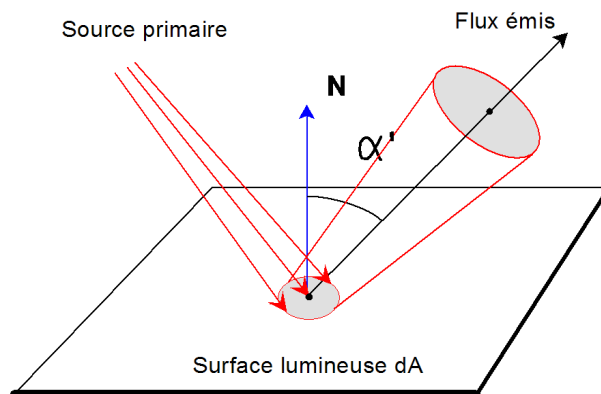


Fig 11- Rayonnement d'une surface lumineuse ou irradiance

Soit l'élément de surface dA de l'objet rayonnant une énergie lumineuse totale Φ dans toutes les directions de l'espace.

Soit $d^2\Phi$ l'énergie rayonnée dans la direction α' ; caractérisée par une intensité dI' .

On définit la *luminance* L de la surface dA par le rapport entre l'intensité émise et la surface apparente de la surface émissive vue sous l'angle α' :

$$L = \frac{dI'}{dA \cos \alpha'}$$

La luminance s'exprime en *W/stéradian/m²* ou en *nit (candela/m²)*

On donc dire qu'un capteur traduira la luminance des objets observés dans la direction de son axe optique.

Réflexion de la lumière sur une surface

La réflectance globale d'un objet caractérise le rapport entre l'énergie incidente reçue de la source et l'énergie réfléchi vers le capteur: $R = \frac{dL}{dE}$

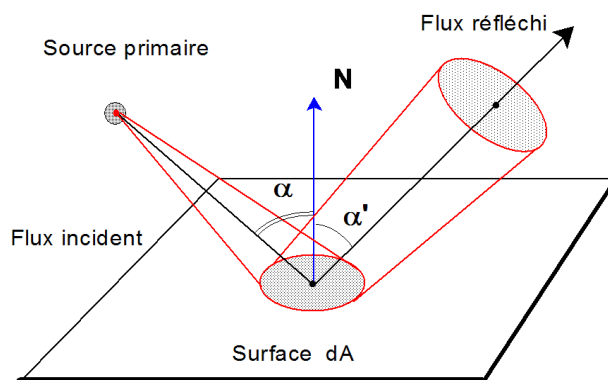


Fig 12 - Réflexion de l'énergie lumineuse

Elle est très variable suivant les matériaux (de 0.01% pour le Vénilia velours noir à 99.9% pour des miroirs de qualité) ainsi que les angles d'incidence α et d'observation α'

Eclairement de la surface d'un capteur

Lors de la formation de l'image sur le capteur, il est utile de déterminer l'éclairement de la surface du capteur en fonction de la luminance de l'objet observé.

Soit un élément dA de l'objet, d'orientation α' par rapport à l'axe optique de la caméra de luminance L . Les rayons issus de cette source pénètrent par l'objectif d'ouverture O et forme une image de surface dA' sur le capteur.

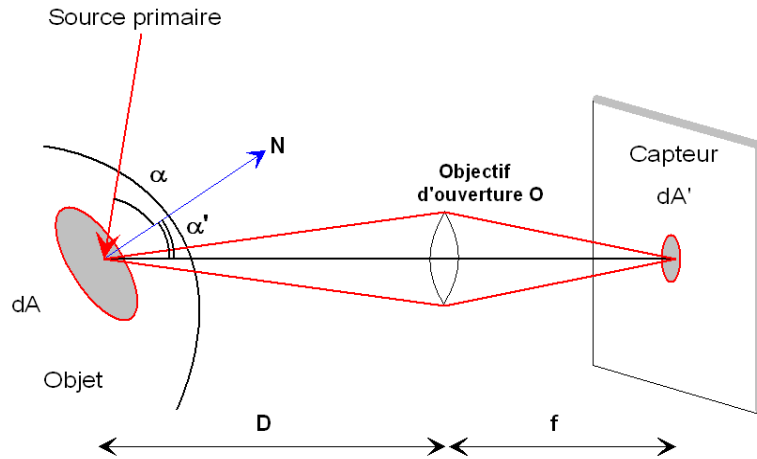


Fig 13 - Image d'une surface éclairée

Pour simplifier le calcul, on suppose que l'objet est à la distance D de l'objectif, que l'image se forme à la distance focale f et que l'objet est dans l'axe optique.

L'énergie reçue par le capteur est le flux total $d\Phi'$ envoyé par dA dans l'angle solide s'appuyant sur l'ouverture de la lentille:

$$d\Phi' = dA \int_{\text{ouverture } O} L \cos \alpha' d\omega$$

Si la distance D est grande devant l'ouverture O , la luminance L l'angle d'observation α' sont constants. D'où

$$d\Phi' = dA L \cos \alpha' \frac{\pi}{4} \frac{O^2}{D^2}$$

Cette énergie se retrouve transmise à l'image dA' formée sur le capteur en supposant les pertes nulles. L'image dA' est dans le rapport de grandissement f/D vis à vis de la surface apparente de la source (calcul géométrique direct par triangles semblables).

$$\frac{dA \cos \alpha'}{D^2} = \frac{dA'}{f^2}$$

d'où

$$d\Phi' = \frac{dA'}{f^2} \frac{D^2}{\cos \alpha'} L \cos \alpha' \frac{\pi}{4} \frac{O^2}{f^2}$$

L'éclairement de la surface du capteur est donc:

$$E' = \frac{d\Phi'}{dA'} = \frac{\pi}{4} L \left(\frac{O^2}{f^2} \right)$$

L'éclairement est proportionnel à la luminance de l'objet et au carré de l'ouverture relative de l'objectif calculé comme le rapport O/f (on constate qu'il faut un diamètre d'ouverture physique d'autant plus grand que la focale est longue pour un objectif).

Réflexions spéculaire et diffuse

L'énergie fournie par la source primaire se répartit suivant plusieurs flux .

- un flux réfléchi par la surface du dioptré d'entrée respectant les lois classiques de l'optique (l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence) appelée *réflexion spéculaire*.
- un flux réfléchi par les structures internes du matériau , ne possédant pas de direction spécifique. C'est la *réflexion diffuse* du matériau.
- un flux absorbé par le matériau et dégradé en énergie thermique. Ce flux ne participe pas à la formation de l'image.
- un flux transmis au travers du matériau, nul lorsque le matériau est opaque. C'est le flux utilisé lors d'une observation par transparence. A noter qu'il peut aussi exister une diffusion par transparence.

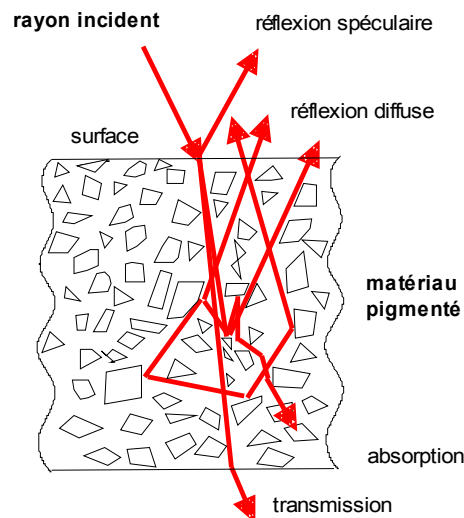


Fig 14 - Trajets de la lumière dans la matière

Pour les matériaux faiblement réfléchissants (surface peinte par exemple), l'énergie réfléchie sera essentiellement diffuse, avec une réflectance plus élevée lorsque l'angle d'observation correspond à l'angle d'incidence de la source. Il en résulte que l'image d'une surface homogène n'est pas caractérisée par une réflectance constante. Ce phénomène est très gênant pour l'interprétation du signal fourni par le capteur.

La réflectance est donc caractérisée par une fonction qui tient compte :

- de la direction du rayon incident par rapport à la normale à la surface (angles θ_i et ϕ_i)
- de la direction d'observation par rapport à la normale à la surface (angles θ_r et ϕ_r)
- de la longueur d'onde λ

Cette fonction est appelée BRDF Bidirectional Reflectance Distribution Function

$$I_r(\theta_r, \phi_r, \lambda) = BDRF(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, \lambda) \cdot I_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)$$

La réflectance d'un matériau homogène sera constante dans deux cas particuliers:

- si l'angle d'observation est constant (observation à grande distance) et différent de l'angle d'incidence de l'éclairage. Il n'y a donc jamais de réflexion directe. Il faut utiliser une source ponctuelle pour parvenir à cette propriété.
- si la réflexion spéculaire est la même pour tous les points. Cette propriété est obtenue par un éclairage diffus (pas de direction privilégiée pour les rayons incidents).

Observation d'un objet tridimensionnel

L'image d'un objet tridimensionnel est généralement complexe, même si cet objet est homogène. La variété des angles d'incidence et d'observation entraîne une variation importante de la réflectance. L'image d'un objet homogène n'est donc pas homogène ; cette propriété est mise parfois à profit pour différencier les différentes faces d'un polyèdre.

Les zones de réflexion spéculaire, si elles existent, représentent une difficulté supplémentaire pour l'analyse d'une face particulière de l'objet. Leur luminance est beaucoup plus importante ce qui peut introduire une saturation du capteur; de plus le spectre de rayonnement est différent de celui des surfaces de réflexion diffuse. Il en résulte une modification de l'aspect coloré des zones de réflexion spéculaire.

L'exemple suivant, obtenu sur une image de synthèse, montre la difficulté de d'analyser les objets de structure géométrique non plane à partir de l'information de luminance (image obtenue par synthèse sur logiciel Povray)

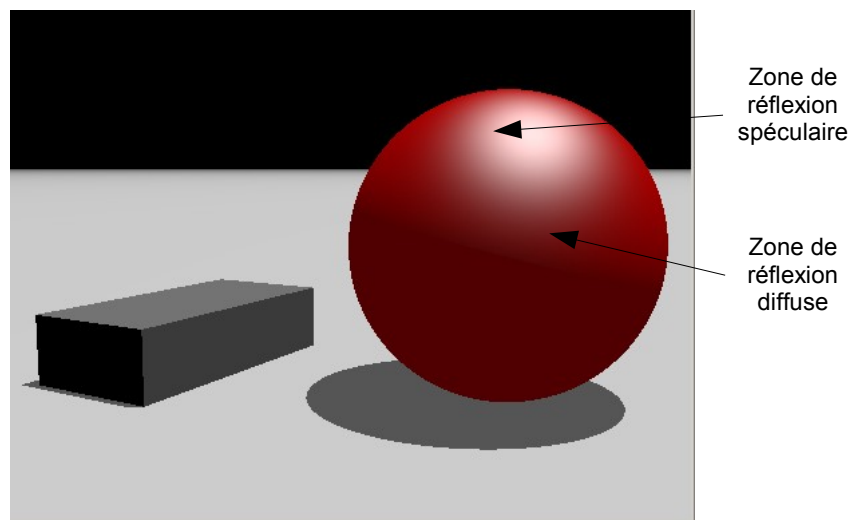


Fig 15 - Mise en évidence de la réflexion spéculaire sur une image de synthèse de deux objets 3D

Image de réflectance

Le cheminement de l'énergie depuis la source d'intensité I_i jusqu'au capteur nous a montré que l'éclairement du capteur (converti en niveau de gris $f(x,y)$) est directement proportionnel à la luminance de l'objet éclairé par la source.

Pour une illumination I_i uniforme, l'image traduit la **réflectance** de l'objet, paramètre souvent à la nature physique de l'objet.

La réflectance d'un matériau homogène sera constante dans deux cas particuliers:

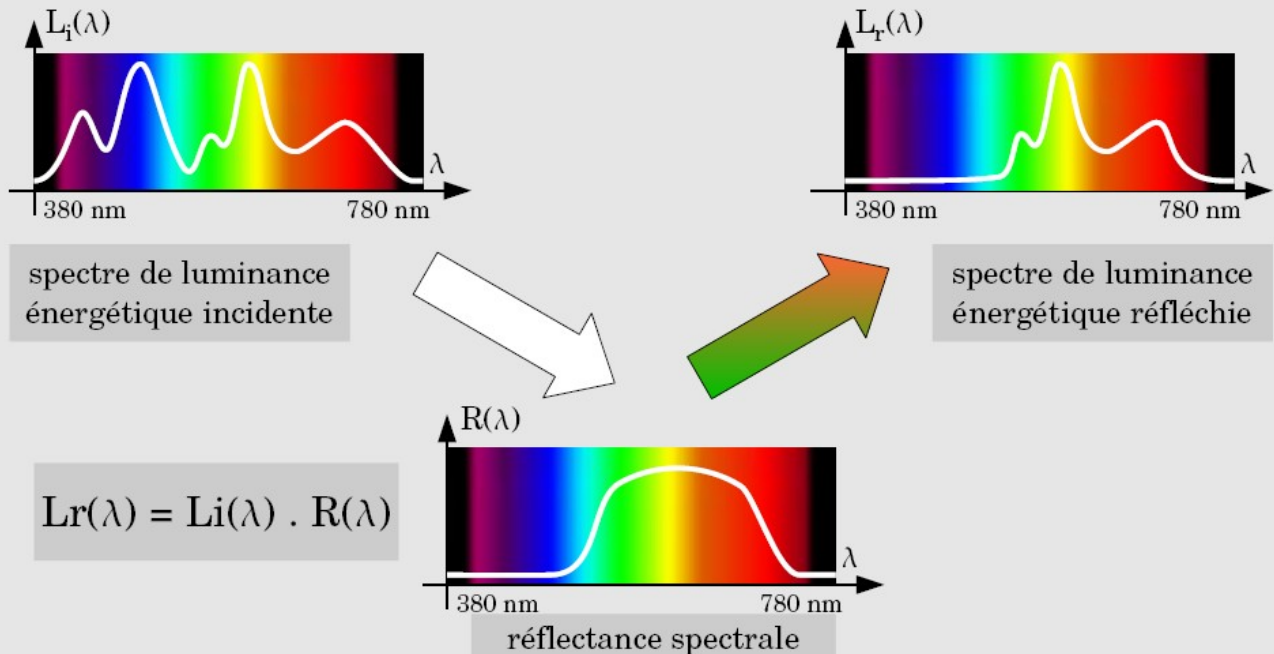
- si l'angle d'observation est constant (observation à grande distance) et différent de l'angle d'incidence de l'éclairage. Il n'y donc jamais de réflexion directe. Il faut utiliser une source ponctuelle pour parvenir à cette propriété.
- si la réflexion spéculaire est la même pour tous les points. Cette propriété est obtenue par un éclairage diffus (pas de direction privilégiée pour les rayons incidents).

Le traitement d'images repose sur l'évaluation de l'homogénéité spatiale de la réflectance ou contraire sur ses variations.

Réflectance spectrale

La réflectance spectrale est la réponse spectrale d'un matériau pour des angles d'incidence et de réflexion fixés. Elle est souvent exploitée comme outil de caractérisation d'un matériau.

Spectre de luminance énergétique de la lumière réfléchie



Le spectre de l'image est le produit du spectre de la source et du spectre de la réflectance.

Pour envisager un contrôle de matériau, il est impératif de connaître le spectre de la source (notion d'illuminant). Remarquer que le contrôle colorimétrique d'objet 3D est très complexe, les angles d'incidence et de réflexion diffuse devant être déterminés.

COMPLEMENTS

[Code de l'image PovRay]#version 3.1

```

#include "colors.inc"
global_settings
{ assumed_gamma 1.0 }
// -----
camera
{
    location <0.0, 0.5, -4.0>
    direction 1.5*z
    right 4/3*x
    look_at <0.0, 0.0, 0.0>
}

light_source
{
    0*x // light's position (translated below)
    color red 1.0 green 1.0 blue 1.0 // light's color
    translate <50, 200, -50>
}
// -----
plane { y, -1 pigment {color rgb <0.9,0.9,0.9>}}
sphere
{ 0.0, 1
    translate <1.0, 0.0, 1.0> // <dX dY dZ>
    texture { pigment{color rgb<0.9,0.0,0.0>} }
    finish { ambient 0.0 specular 0.8 }
}
box
{<-0.5, -1 ,2> // one corner position <X1 Y1 Z1>
  < 0.5, 0, 0> // other corner position <X2 Y2 Z2>
  translate <-2, -0.5, 0.0> // <dX dY dZ>
  rotate <0, 30, 0> // <dX dY dZ> (in degrees)
  texture { pigment{color rgb<0.3,0.3,0.3>} }
  finish { ambient 0.0 specular 0.8 }
}

```