

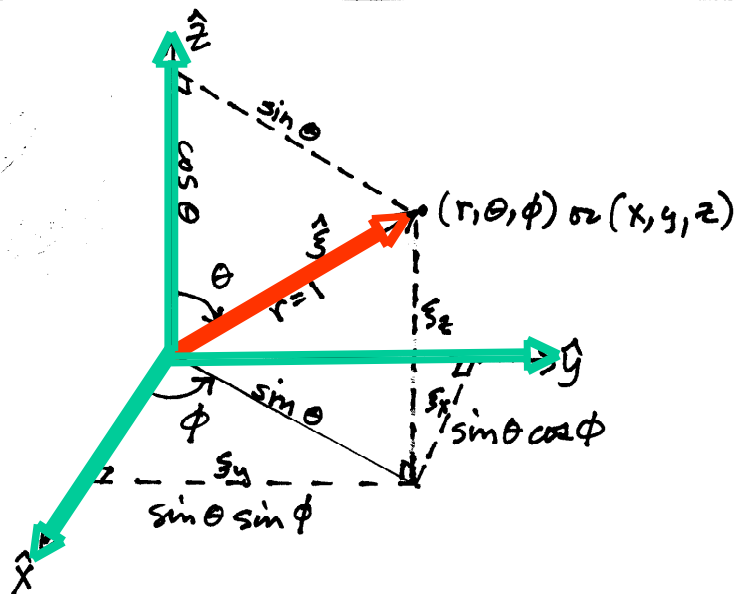
## Chapitre II - Radiométrie et IOPs

### 1) Radiométrie

(source pour les encadrés : Présentation de Mobley, Light and radiometry, Optics summer school 2007)

Quelques notations ou rappels sur les angles et mesures dérivées

### UNIT VECTORS FOR DIRECTIONS



$\hat{s}$  is a unit vector specifying direction  $(\theta, \phi)$

$$|\hat{s}| = 1 = \hat{s} \cdot \hat{s} \quad (\text{dot product}) = s_x^2 + s_y^2 + s_z^2$$

$$\hat{s} = s_x \hat{x} + s_y \hat{y} + s_z \hat{z}$$

$$\hat{s} = (\sin \theta \cos \phi) \hat{x} + (\sin \theta \sin \phi) \hat{y} + (\cos \theta) \hat{z}$$

gives  $\hat{s}$  in cartesian coords given  $(\theta, \phi)$

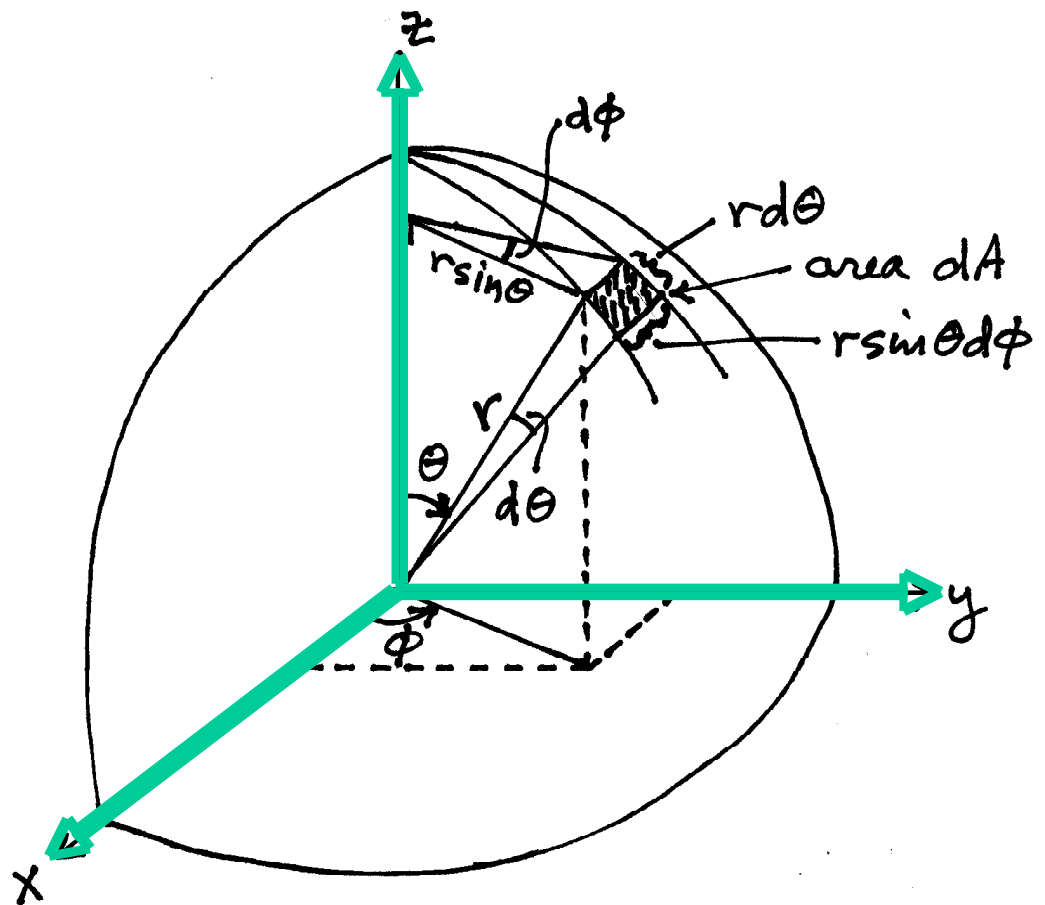
Inverse:

$$\theta = \cos^{-1}(s_z) \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{s_y}{s_x}\right)$$

gives  $(\theta, \phi)$  from  $(s_x, s_y, s_z)$

Attention, dans ce cours, la direction correspond à la direction de propagation de la lumière ; donc la direction dans laquelle la lumière va. Les expérimentalistes donnent des angles qui correspondent à la direction dans lequel l'instrument regarde (direction de vue ou de visée).  
 $\theta_{instr} = \pi - \theta$  et  $\phi_{instr} = \pi + \phi$

## COMPUTING SOLID ANGLES

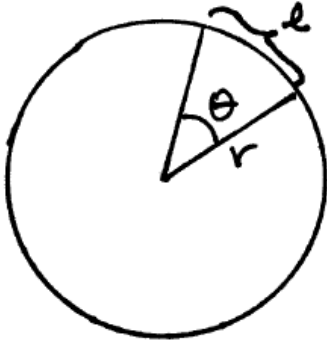


element of solid angle  $d\Omega = \frac{dA}{r^2}$

$$\boxed{d\Omega = \frac{r \sin \theta d\phi \, r d\theta}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi}$$

Le repère est orienté ver le nadir , c'est à dire que pour une lumière venant du soleil et descendant à la verticale, on a  $\theta = 0^\circ$

PLANE ANGLE:

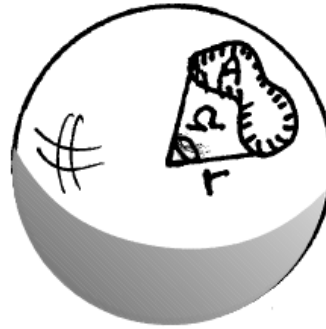


circle

$$\text{angle} \equiv \frac{\text{arc length}}{\text{radius}}$$

$$\theta = \frac{l}{r} \text{ (radians)}$$

SOLID ANGLE:



sphere

$$\text{solid angle} \equiv \frac{\text{area}}{\text{radius}^2}$$

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ (steradians)}$$

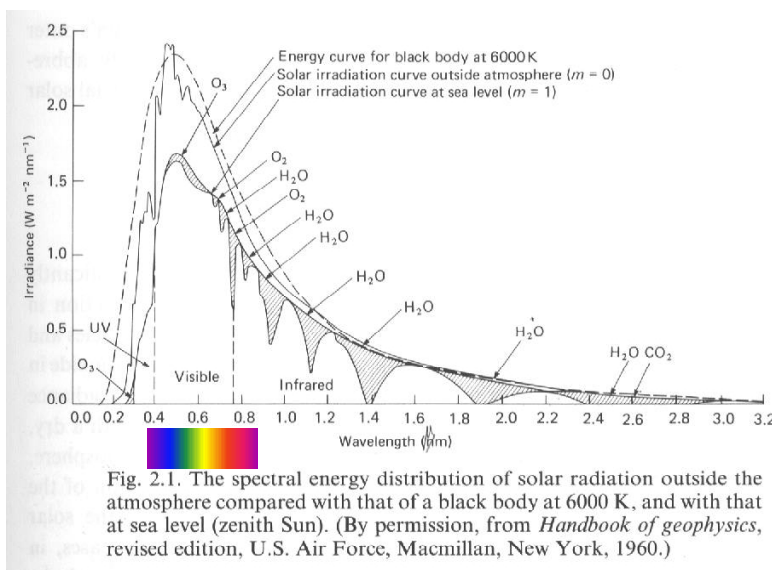
A la surface de la terre, la lumière qui nous parvient du soleil ne contient pas toutes les ondes EM issues du soleil. Certaines sont absorbées par l'atmosphère du soleil (raies de Fraunhofer,  $\Delta\lambda < 0.1 \text{ nm}$ ), d'autres par l'atmosphère terrestre.

En moyenne au sommet de l'atmosphère  $E_s = 1367 \text{ W/m}^2$  [Frolich, 1983]

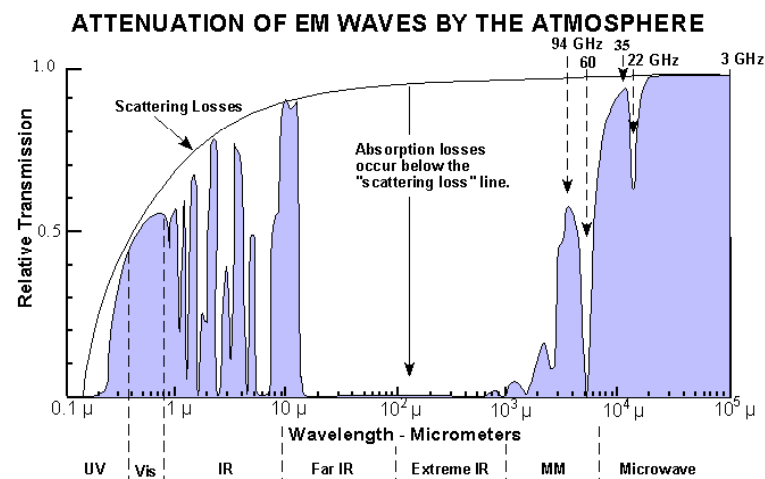
Répartition :  $< 350 \text{ nm}$  : 4.5 % , de 350 à 400 nm : 4,2% ; de 400 à 700 nm : 38.2% ; de 700 à 1000 nm : 22.6% ;  $> 1000 \text{ nm}$  : 30.5%

Après la traversée de l'atmosphère, les valeurs sont de l'ordre :

$E = 500 \text{ W/m}^2$	clair ; soleil au zénith
$E = 450 \text{ W/m}^2$	clair ; soleil à $60^\circ$ du zénith
$E = 300 \text{ W/m}^2$	couvert ; soleil à $60^\circ$ du zénith
$E = 100 \text{ W/m}^2$	couvert ; soleil à l'horizon
$E = 10^{-3} \text{ W/m}^2$	clair ; pleine lune
$E = 3 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$	clair ; étoiles



Attention à la courbe de Gauche, valeurs moyennées tous les  $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$   
Lissage des raies de Fraunhofer



Spectre de transmission de l'atmosphère. Dans le visible, les pertes résultent principalement de la diffusion Rayleigh, alors que dans l'infrarouge, elles proviennent de l'absorption.

\* La **luminance L** (en anglais : radiance) mesure une quantité d'énergie spectrale dans une direction donnée, ou plus exactement dans un angle solide; d'où son unité de mesure : le J/s/m<sup>2</sup>/nm/sr.

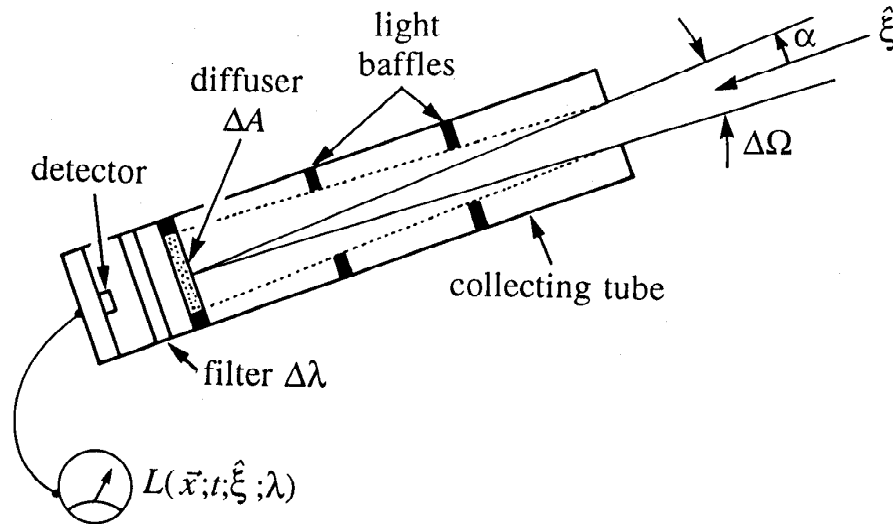


Fig. 1.5. Schematic design of an instrument for measuring unpolarized spectral radiance.

$$L(\vec{x}, t, \hat{\xi}, \lambda) \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \Omega \Delta \lambda} \quad (\text{operational definition})$$

$$\frac{\text{J}}{\text{s m}^2 \text{sr nm}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr nm}}$$

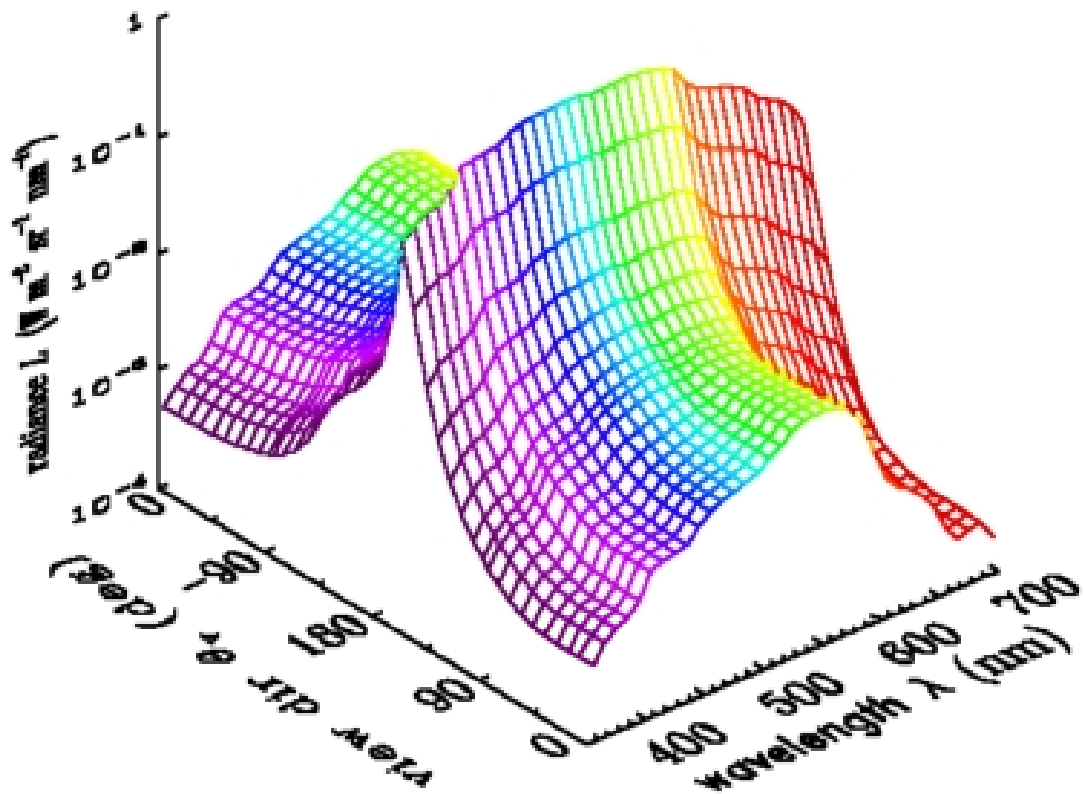
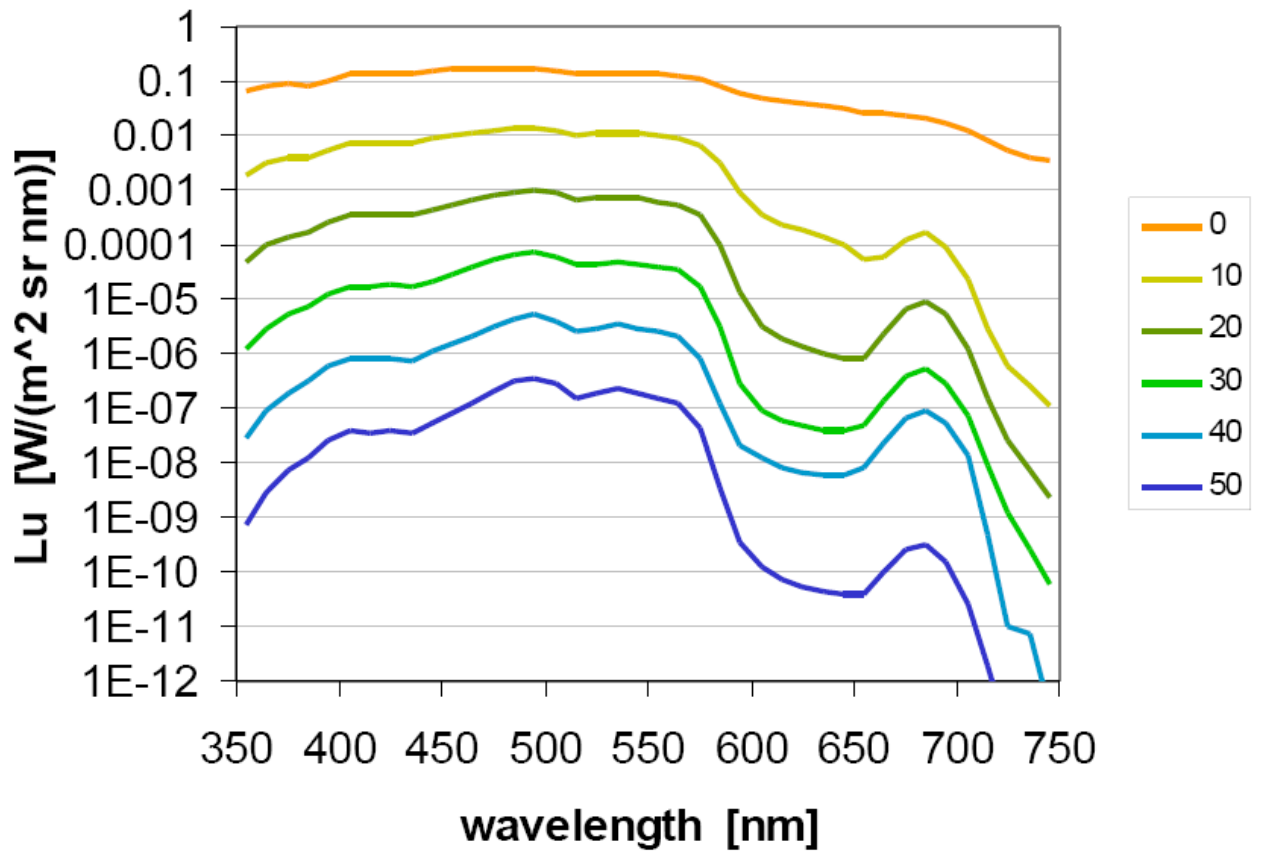
La luminance (radiance) est difficile à représenter en graphe car elle contient beaucoup de variables. A un temps t, si on réduit la position à la position verticale, on a  $L(z, \theta, \phi, \lambda)$

Exemple Page suivante haut:

$L_u(z, 0^\circ, \phi, \lambda)$  en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , à différentes profondeurs (0, 10, 20, 30, 40 et 50 m), pour un angle de nadir de  $0^\circ$  (ie c'est de la lumière montante ; qui arrive du bas en ligne droite avec un détecteur pointé vers le bas) et  $\phi$  dans le plan du soleil.

Page suivante bas:

Ld luminance venant du haut en faisant varier l'angle de vue de l'horizon à  $180^\circ$  (en regardant le zenith) puis redescendant à l'autre horizon, et tout cela dans le plan du soleil



à la profondeur  $Z = 5\text{m}$ , en faisant varier l'angle azimuthal  $\phi$ .

\* **L'éclairement descendant  $E_d$**  (ascendant  $E_u$  ; en anglais : downwelling ou upwelling irradiance) est défini comme la quantité spectrale -i.e. à une longueur d'onde donnée- d'énergie venant d'une hémisphère tournée vers le bas (haut) et mesurée pendant un intervalle de temps donné. L'unité de l'éclairement est le  $J/s/m^2/nm$  ou le  $W/m^2/nm$ .

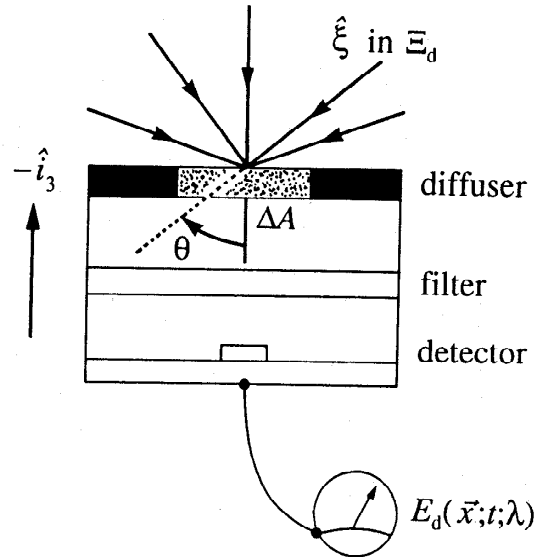


Fig. 1.6. Schematic design of an instrument for measuring spectral plane irradiance.

$$E_d(\vec{x}, t, \lambda) \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \lambda} \left( \frac{W}{m^2 nm} \right)$$

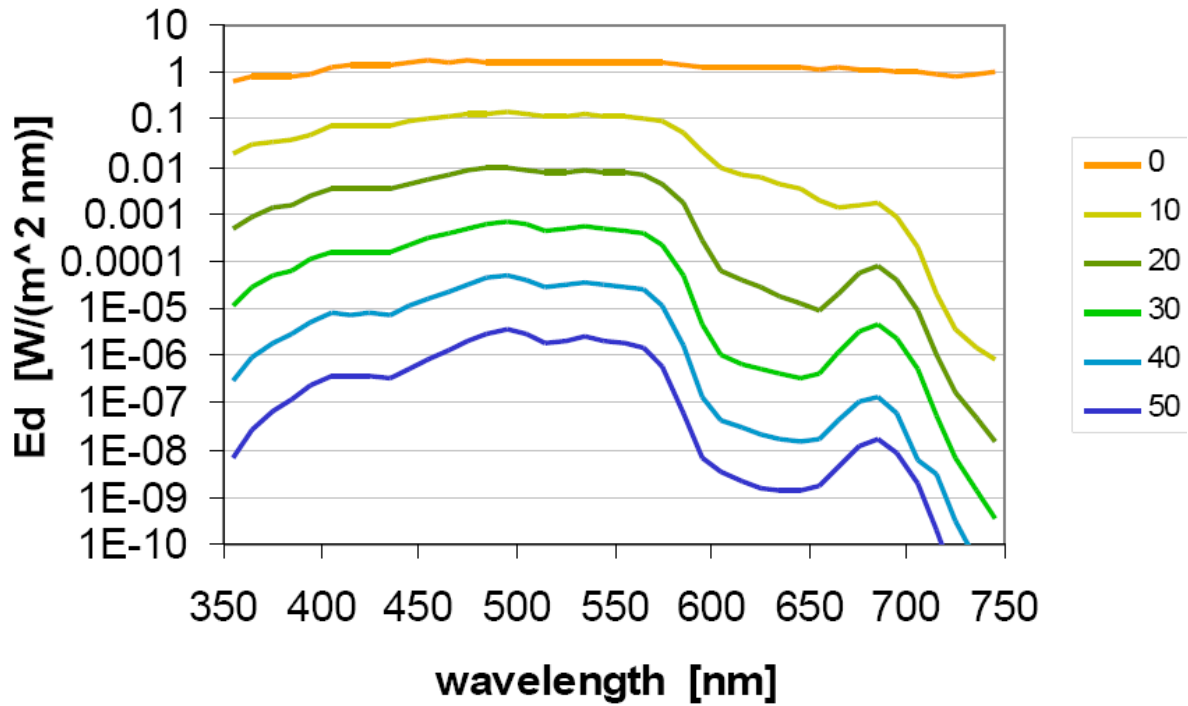
To compute  $E_d$  from  $L$ , note that the effective area of the detector seen by radiance in direction  $\theta$  is  $\Delta A |\cos \theta|$ , so

$$E_d = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) |\cos \theta| \sin \theta d\theta d\phi$$

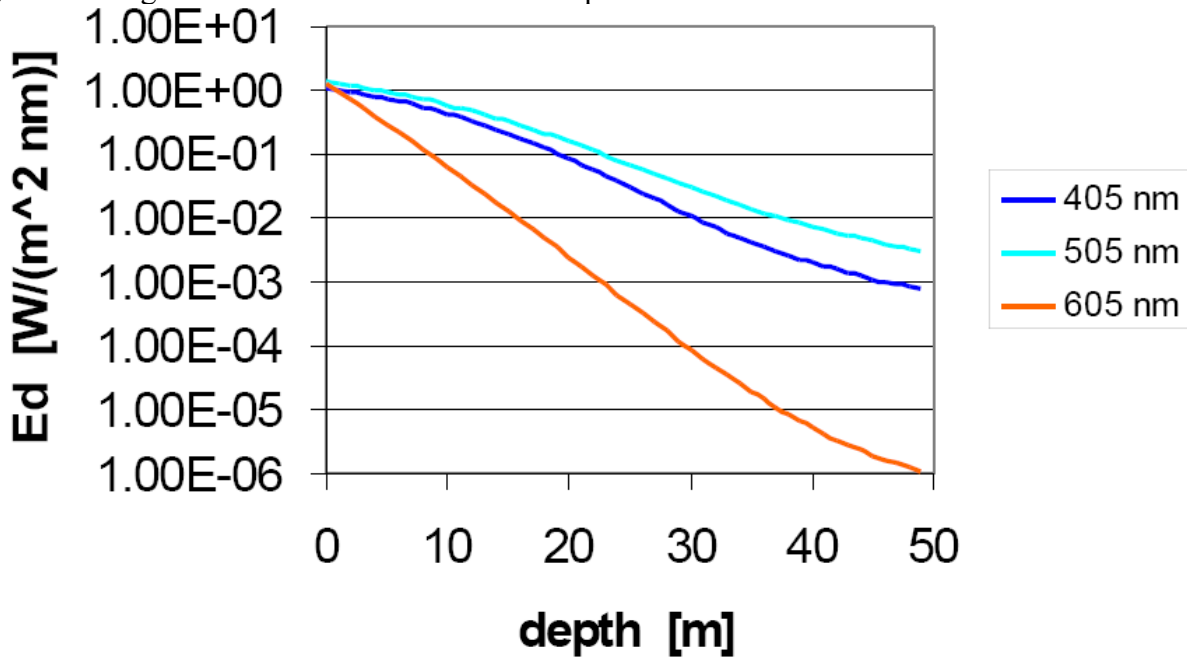
Le capteur mesurant l'éclairement peut être appelé capteur cosinus à cause de la formule ci-dessus.

Ed est plus facile à représenter graphiquement que L, étant donné qu'elle dépend de moins de variables. A un temps donné,  $E_d(z, \lambda)$ . Voici  $E_d$  :

a) en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , à différentes profondeurs (0, 10, 20, 30, 40 et 50 m) ;



b) à trois longueurs d'onde et en fonction de la profondeur.





\* **L'éclairement scalaire spectral** (en anglais spectral scalar irradiance) correspond à l'éclairement vu dans toutes les directions, mesuré par une sphère (donc ne faisant pas intervenir de terme en cosinus).

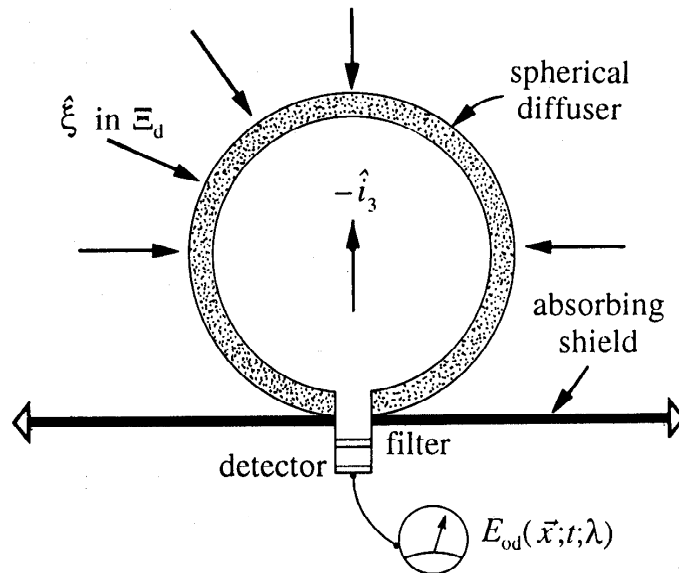


Fig. 1.7. Schematic design of an instrument for measuring spectral scalar irradiance.

$$E_{od} \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \lambda} \left( \frac{W}{m^2 nm} \right)$$

To compute  $E_{od}$  from  $L$ , note that the detector has the same effective area for radiance in any direction, so

$$E_{od} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi$$

no  $|\cos \theta|$  factor

\* La mesure du **PAR (Photosynthetically Available Radiation)** est un nombre de photons, de longueur d'onde comprise entre 400 et 700 nm (c'est donc une quantité non spectrale),

reçus par une surface donnée, pendant un intervalle de temps donné, et venant de toutes les directions (unité : photons/s/m<sup>2</sup> ou Einstein/s/m<sup>2</sup>; avec 1 Einstein = 1 Na photons = 6,023 10<sup>23</sup> photons ; Na étant le nombre d'Avogadro).

The convenient measure of how much light is available for photosynthesis is

$$\text{PAR} \equiv \int_{400}^{700} E_0 \frac{\lambda}{hc} d\lambda \quad \left( \frac{\text{photons}}{\text{m}^2 \text{s}} \right)$$

↑ converts energy to number of photons

also see  $\mu\text{Einst}/\text{m}^2\text{s}$

Attention PAR n'est pas une mesure spectrale. Ce n'est pas non plus une mesure d'énergie. Il faut se méfier des valeurs de PAR fournies en Watt. Elles s'appuient sur une hypothèse de composition de l'eau, et donc de distribution de l'absorption des photons. Elle dérive généralement de l'article Morel et Smith, 1974 (Limnol, 19 (4), Relation between total quanta and total energy for aquatic photosynthesis); ou le facteur de conversion Quanta/Energy est 1 Watt  $\approx 2.5 \cdot 10^{18}$  quanta/s  $\approx 2.5 \cdot 10^{18}$  photons/s  $\approx 4.2 \mu\text{Einst/s}$ . Cette relation peut ne pas être adaptée à des milieux côtiers non oligotrophes.

Rappel : 1 Watt = 1 J/s = 1 N.m/s = 1 kg.m<sup>2</sup> /s<sup>3</sup>

## 2) Propriétés optiques de l'eau

Une propriété est, par définition, une qualité particulière du milieu considéré, ici l'eau de mer. Des paramètres suffisamment stables pour être considérés comme caractéristiques du milieu marin peuvent donc être appelés des propriétés. De plus, si ces propriétés ne dépendent pas de la lumière mais seulement du milieu, où plus exactement des composantes du milieu, elles sont dites « inhérentes ». Si des propriétés dépendent du milieu, mais aussi de la lumière, elles sont appelées propriétés optiques apparentes. Ces définitions ont été introduites par Preisendorfer en 1976.

Les acronymes suivants, même si ils sont anglais, sont utilisés couramment dans le milieu océanographique français :

IOP = propriété optique inhérente (Inherent Optical Property)

AOP = propriété optique apparente (Apparent Optical Property)

### 3) IOPs dans l'eau

Quand un flux de lumière  $\phi_o$  rencontre un volume d'eau, une fraction  $\phi_a$  est absorbée à l'intérieur du volume, une partie  $\phi_b$  est diffusée tout autour et une autre est transmise  $\phi_t$  (figure). L'absorbance est définie comme  $A = \phi_a / \phi_o$ .

Attention pour les biogéochimistes : Cette absorbance n'est pas à confondre avec l'absorbance ou densité optique mesurée par les spectrophotomètres (en laboratoire), qui s'écrit  $D(\lambda) = \log_{10} (\phi_o / (\phi_b + \phi_t)) = -\log_{10} (1 - A(\lambda))$  [Kirk, 1983, 1994].

Si un faisceau de rayons lumineux monochromatiques traverse une longueur  $l$  de ce volume, on définit le coefficient d'absorption,  $a(\lambda)$  ( $m^{-1}$ ) comme la limite de  $A/l$  pour  $l$  tendant vers 0. Respectivement, le coefficient de diffusion,  $b(\lambda)$  ( $m^{-1}$ ) est défini de la même façon en remplaçant  $\phi_a$  par  $\phi_b$ .

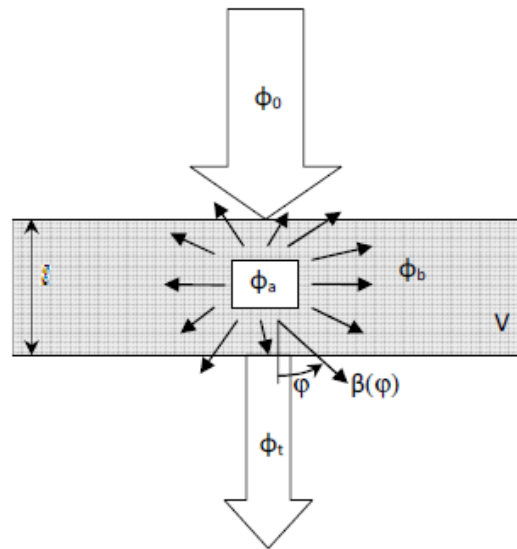


Figure 1-1 : D'après Morel (2008). Un faisceau monochromatique de rayons lumineux d'intensité  $\phi_o$  traverse un volume V d'eau de mer de longueur l. Une partie de la lumière est absorbée ( $\phi_a$ ), une autre diffusée ( $\phi_b$ ) et une autre transmise ( $\phi_t$ ). La partie diffusée est la somme des diffusions  $\beta(\varphi)$  à chaque angle  $\varphi$ .

Rappel - Pour la plupart des substances, le taux d'absorption varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente, menant à l'apparence de couleur dans les pigments qui absorbent certaines longueurs d'onde mais pas d'autres. Par exemple, avec une lumière blanche incidente, un objet qui absorbe les longueurs d'onde dans le bleu, vert et jaune, apparaîtra de couleur rouge. Un matériau de couleur noire absorbe ainsi toutes les longueurs d'onde (converties en chaleur), alors qu'un matériau de couleur blanche les réfléchit.

Note - Des chercheurs du Rensselaer Polytechnic Institute ont créé un matériau à partir de nanotubes de carbone pouvant absorber 99,955 % de la lumière (Janvier 2008).

## Diffusion

Du fait de la diffusion, un volume élémentaire observé depuis une distance suffisamment grande peut être considéré comme un point source éclairant dans toutes les directions. Le champ lumineux diffusé dans la direction  $(\theta, \varphi)$ , où  $\theta$  est l'angle polaire à la direction de propagation et  $\varphi$  est l'angle azimutal, est caractérisé par l'indicatrice de diffusion  $\beta(\theta, \varphi)$  ( $m^{-1} sr^{-1}$ ). De façon plus pragmatique, les anglais nomment  $\beta$  la « Volume Scattering Function », dont la notation abrégée est VSF. Le coefficient de diffusion est égal à la somme de l'indicatrice diffusion sur tout l'angle solide:

$$b(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \beta(\lambda, \varphi) \sin(\varphi) d\varphi. \quad (1-4)$$

Cette intégrale peut-être décomposée en deux. On définit le coefficient de diffusion avant  $b_f$  et le coefficient de rétrodiffusion  $b_b$  par :

$$b_f(\lambda) = 2\pi \int_0^{\pi/2} \beta(\lambda, \varphi) \sin(\varphi) d\varphi, \quad (1-5)$$

$$b_b(\lambda) = 2\pi \int_{\pi/2}^\pi \beta(\lambda, \varphi) \sin(\varphi) d\varphi. \quad (1-6)$$

Il existe une fonction de phase de diffusion volumique spectrale, notée  $\beta'(\lambda, \psi) = \beta(\lambda, \psi)/b(\lambda)$  en  $sr^{-1}$ . C'est l'équivalent de la VSF normalisée donc elle est telle que son intégration sur la sphère complète donne l'unité.

## Atténuation

La somme des deux quantités  $a(\lambda)$  et  $b(\lambda)$  est le coefficient d'atténuation  $c(\lambda)$  ( $m^{-1}$ ) :

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)$$

L'absorption  $a$  et la diffusion  $b$  font partie des propriétés inhérentes optiques (IOPs) du milieu. Plus rigoureusement, c'est l'indicatrice de diffusion  $\beta$  qui est une IOP et  $b$ , produit dérivé en est une aussi, ainsi que la VSF et  $\beta'$ . De même, l'atténuation étant la somme de  $a$  et  $b$ , elle est aussi une IOP.

Les autres IOPs incluent l'indice de réfraction ainsi qu'une propriété appelée albedo (strictement : albedo de diffusion simple spectrale)  $\omega(\lambda) = b(\lambda) / c(\lambda)$ . Elle est aussi nommée probabilité de survie du photon car elle représente la probabilité qu'un photon a d'être diffusé plutôt qu'absorbé.

Les IOPs sont additives, c'est-à-dire qu'il est possible de décomposer, par exemple, le coefficient (total) d'absorption ou de diffusion en la somme des absorptions ou des diffusions propres à chaque constituant du milieu.