

Chapitre IV – Lumière à travers la colonne d'eau

Introduction - Couleur de l'eau

« La terre est bleue comme une orange, mais la science ne ment pas »... (Eluard, 1929). Le premier facteur qui entre en jeu est la réflexion de la lumière sur l'eau (même si cette réflexion est relativement faible). Si le ciel est bleu, la mer paraîtra bleue. Si le ciel est gris, la mer paraîtra grise ; si le ciel est rouge au coucher du soleil, une traînée rouge apparaîtra sur l'eau etc... l'inverse n'étant évidemment pas vrai. La mer peut prendre d'autres couleurs en fonction des conditions d'éclairement, éventuellement de la nature du fond et des caractéristiques de la côte, de la couverture nuageuse, de l'état de la mer, ... mais aussi de la nature et de la concentration des substances et particules en suspension, etc. En effet, le deuxième facteur clef est la couleur de la lumière qui ressort de l'eau, celle-ci dépendant des propriétés d'absorption et de diffusion de la molécule d'eau H_2O et des constituants de l'eau de mer. Une grande étendue d'eau apparaît généralement bleue. Cependant, de nombreux changements de couleur ont été observés depuis longtemps. Ils ont donné nom à de nombreuses étendues d'eau, comme par exemple : la mer Rouge, le Rio Negro, le lac Noir, etc. S'intéresser à ces changements de couleur revient à se poser la question : quelles sont les propriétés optiques de l'eau et comment varient-elles ?

Note : Il est possible que La Mer Rouge s'appelle ainsi en raison de la présence d'une algue particulière, « *Trichodesmium Erythraeum* ». A la fin de la floraison de ces algues, la couleur bleu-vert de la mer semble se changer en une couleur rougeâtre ou brune. Le Rio Negro est un affluent de l'Amazone. Sa couleur noire vient d'une importante absorption causée par de fortes concentrations en fer et en matière organique dissoute due à l'humus en décomposition dont il se charge en traversant les sols forestiers. En montagne, il existe des centaines de lacs portant le nom de lac noir. Le fort coefficient d'absorption des lacs noirs explique leur couleur, de même que la forte concentration en substances dissoutes explique le nom du Rio Negro. Une marée rouge peut être due à un bloom de dinoflagellés spécifiques, absorbant toutes les couleurs du visible sauf le rouge.

A) Interface air/mer

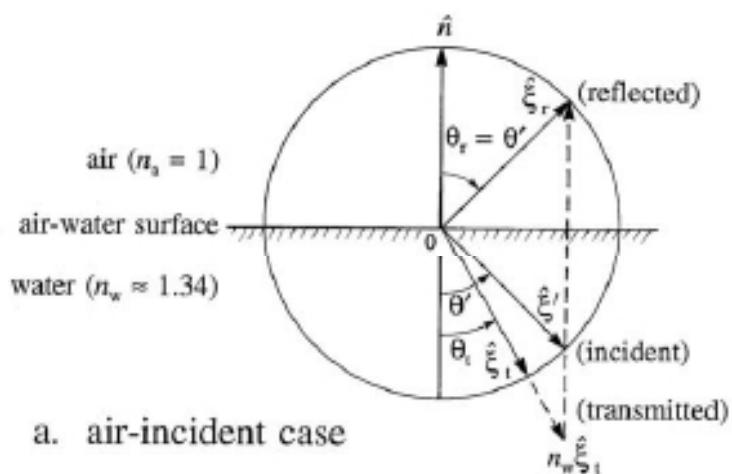
Dans le cas d'une surface plane, on peut appliquer le théorème de Snell-Descartes

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

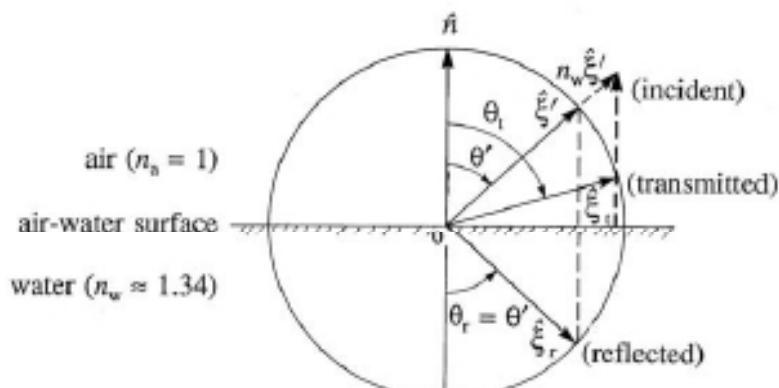
Si l'on considère l'interface air/mer, un rayon incident venant de l'air va avoir un rayon transmis dans l'eau avec un angle θ_2 inférieur à l'angle incident puisque l'indice de réfraction de l'eau est plus grand que celui de l'air. Un rayon venant de l'air pourra donc toujours « entrer » dans l'eau.

Par contre, pour un rayon venant de l'eau et sortant dans l'air, le rayon transmis dans l'air se retrouve avoir un angle plus grand que le rayon incident. Il existe donc un angle au-dessus duquel la réflexion interne est totale. Cet angle correspond à $\theta_i = \text{Arc sin} (n_{\text{air}}/n_w)$, soit environ 48° . Si un rayon dans l'eau arrive à la surface avec un angle d'incidence supérieur à 48° , il n'est pas transmis vers l'extérieur.

Note : Il est plus facile pour la lumière de rentrer dans l'eau que d'en sortir.



a. air-incident case



b. water-incident case

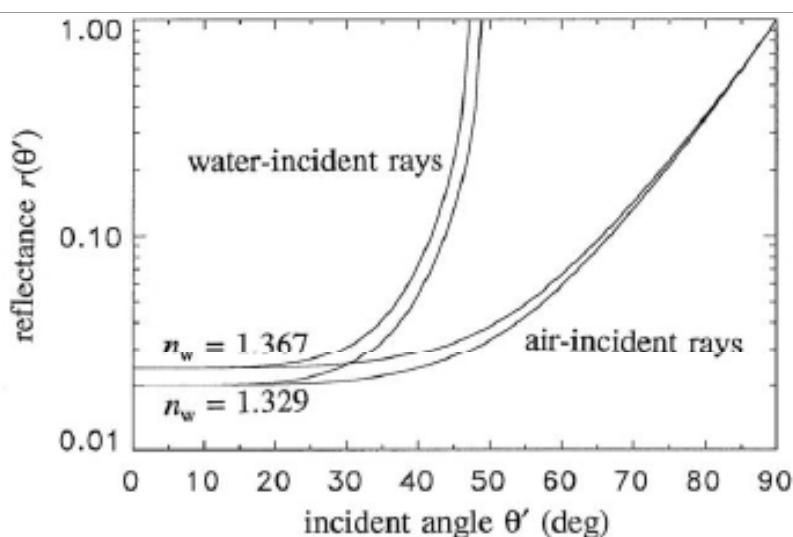


Fig. 4.3. Behavior of the Fresnel reflectance function of Eq. (4.14) for the extreme values of the real index of refraction n_w encountered in hydrologic optics.

(Voir section 6 du premier chapitre)

Pour une surface non plane, la situation se complique. Mobley (1994) a choisi de gérer la surface en utilisant des mini-sphères pouvant s'adapter à une surface accidentée. Ces sphères sont découpées en M bandes zonales et N quartiers méridionaux. Les divisions en quartiers et bandes peuvent ne pas être régulières suivant les applications.

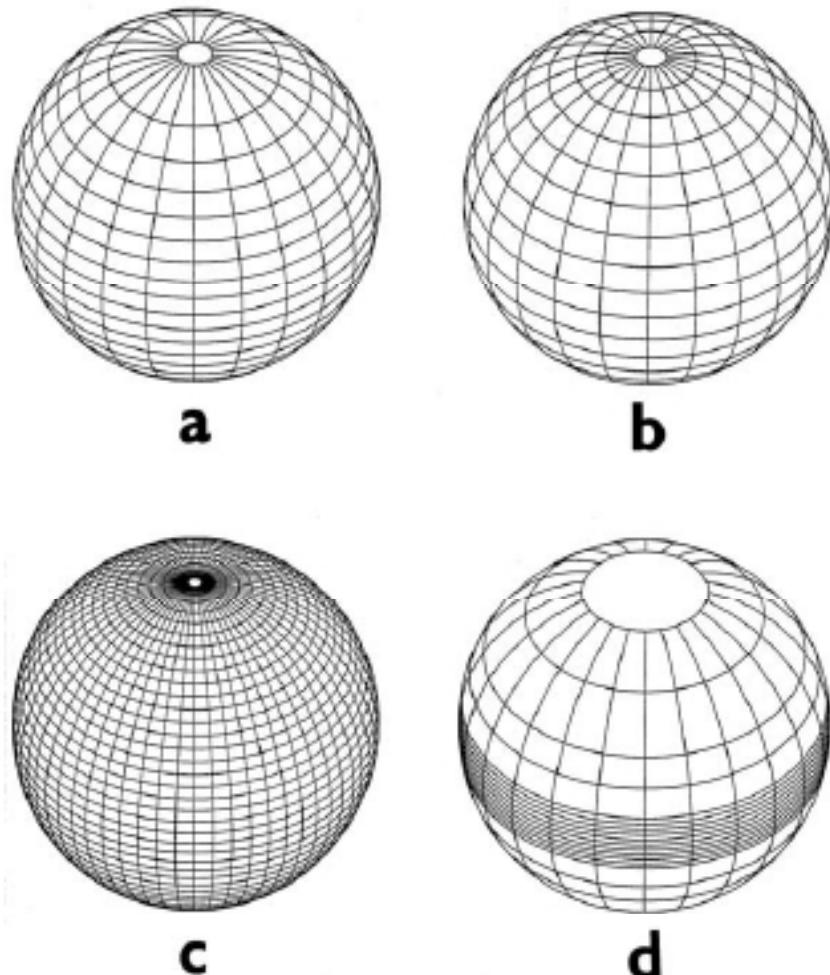


Fig. 4.19. Further examples of partitions of the unit sphere into quads. (a) $m = 10$ μ -bands and $n = 12$ ϕ -bands, with all solid angles Ω_{pq} and Ω_m equal. (b) $m = 10$ and $n = 12$, with all $\Delta\theta$ values equal. (c) $m = 23$, $n = 30$, with equal $\Delta\theta$ values, so that $\Delta\theta \approx 4^\circ$, $\Delta\phi = 6^\circ$. (d) $m = 10$, $n = 12$, with an *ad hoc* selection of the $\Delta\theta$ values. [redrawn from Mobley and Preisendorfer (1988)]

B) Devenir de la lumière dans l'eau

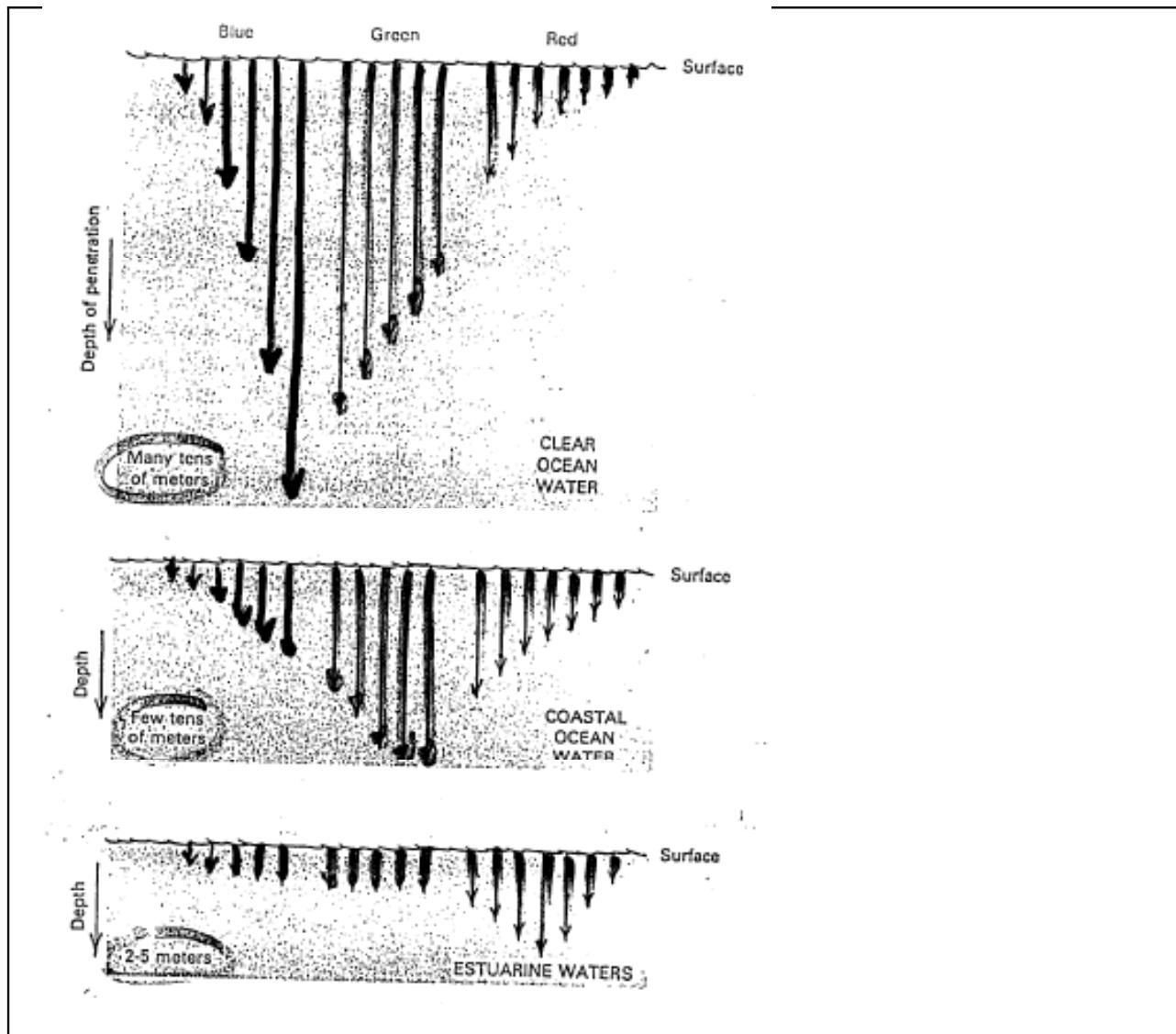
Deux règles principales constituent le B, A, BA de ce domaine :

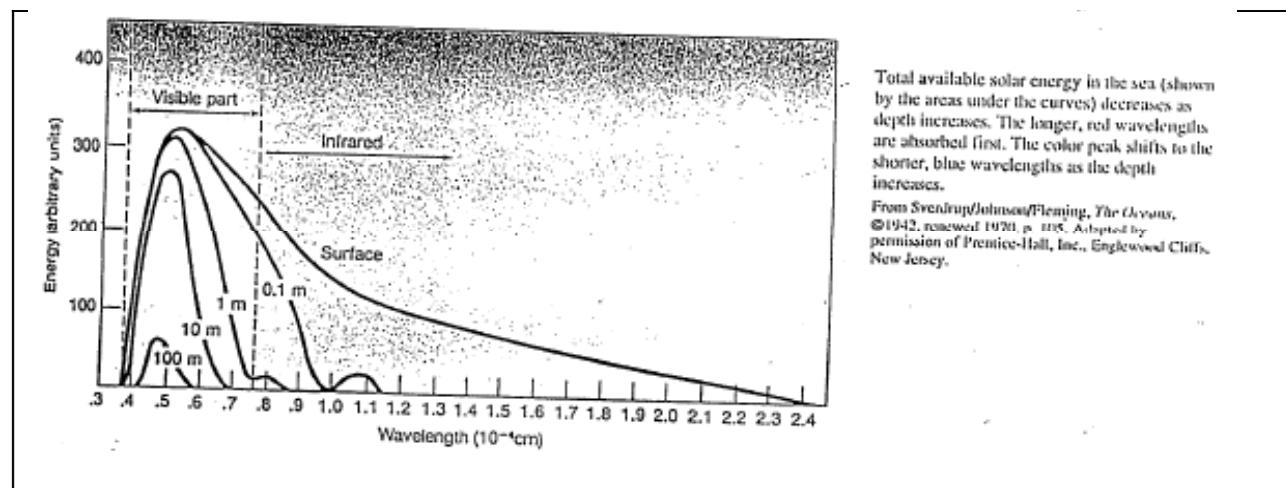
- plus on s'enfonce, plus le chemin parcouru par la lumière est long, donc plus la lumière diminue (soit pas absorption, soit pas diffusion). Donc il existe de moins en moins d'énergie électromagnétique venant du soleil plus la profondeur augmente
- la disparition de la lumière dépend de ce qu'il y a dans l'eau (voir Chapitre 3). Plus

l'eau est turbide, plus la lumière disparaît vite ; plus l'eau est claire, plus la lumière descend en profondeur.

Dans tous les cas, la lumière a tendance à devenir monochromatique avec la profondeur.

Note : on considère que l'eau est « transparente » ; cependant elle absorbe. Si elle n'absorbait pas autant qu'elle le fait, elle serait « froide et sans vie ».

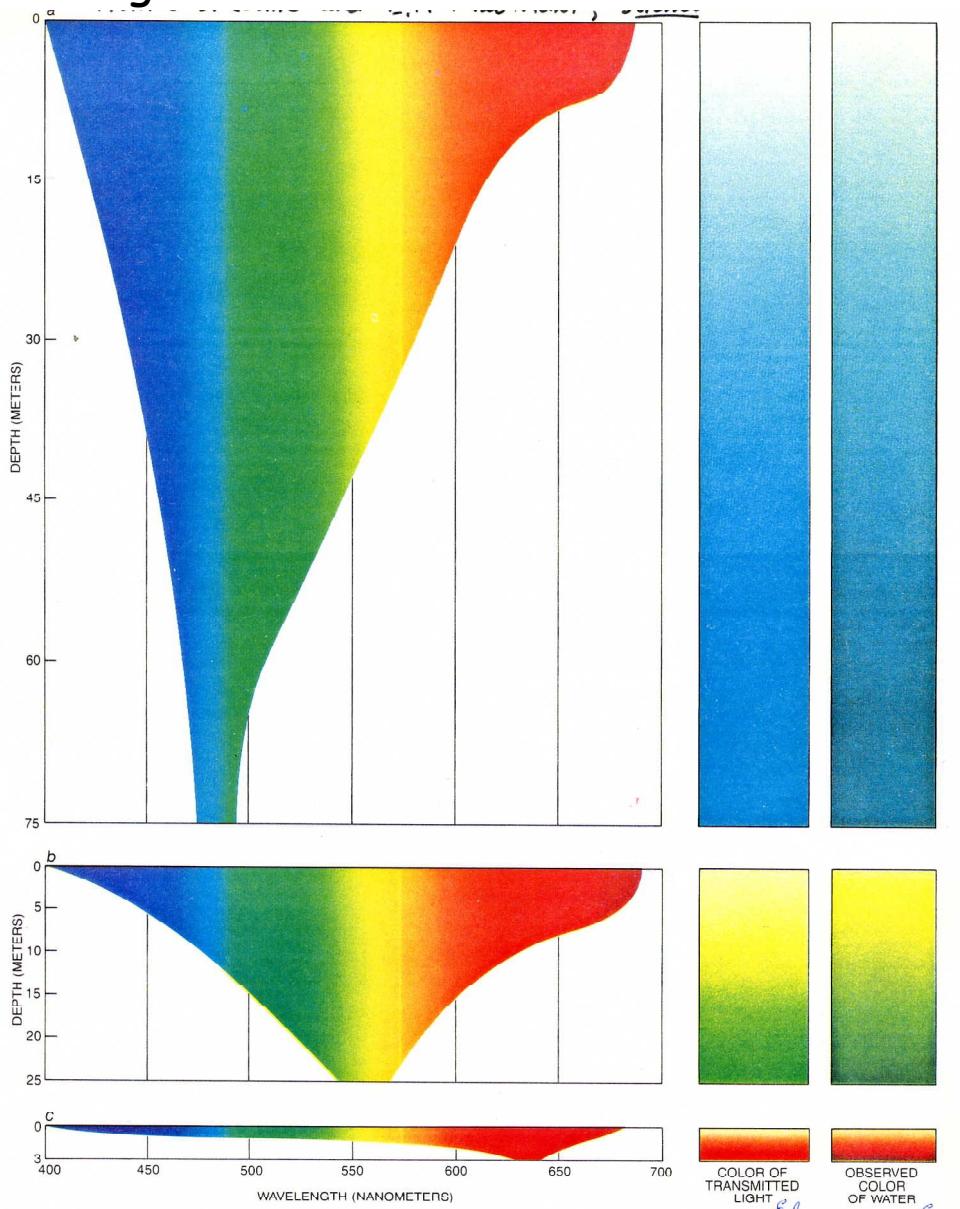




Total available solar energy in the sea (shown by the areas under the curves) decreases as depth increases. The longer, red wavelengths are absorbed first. The color peak shifts to the shorter, blue wavelengths as the depth increases.

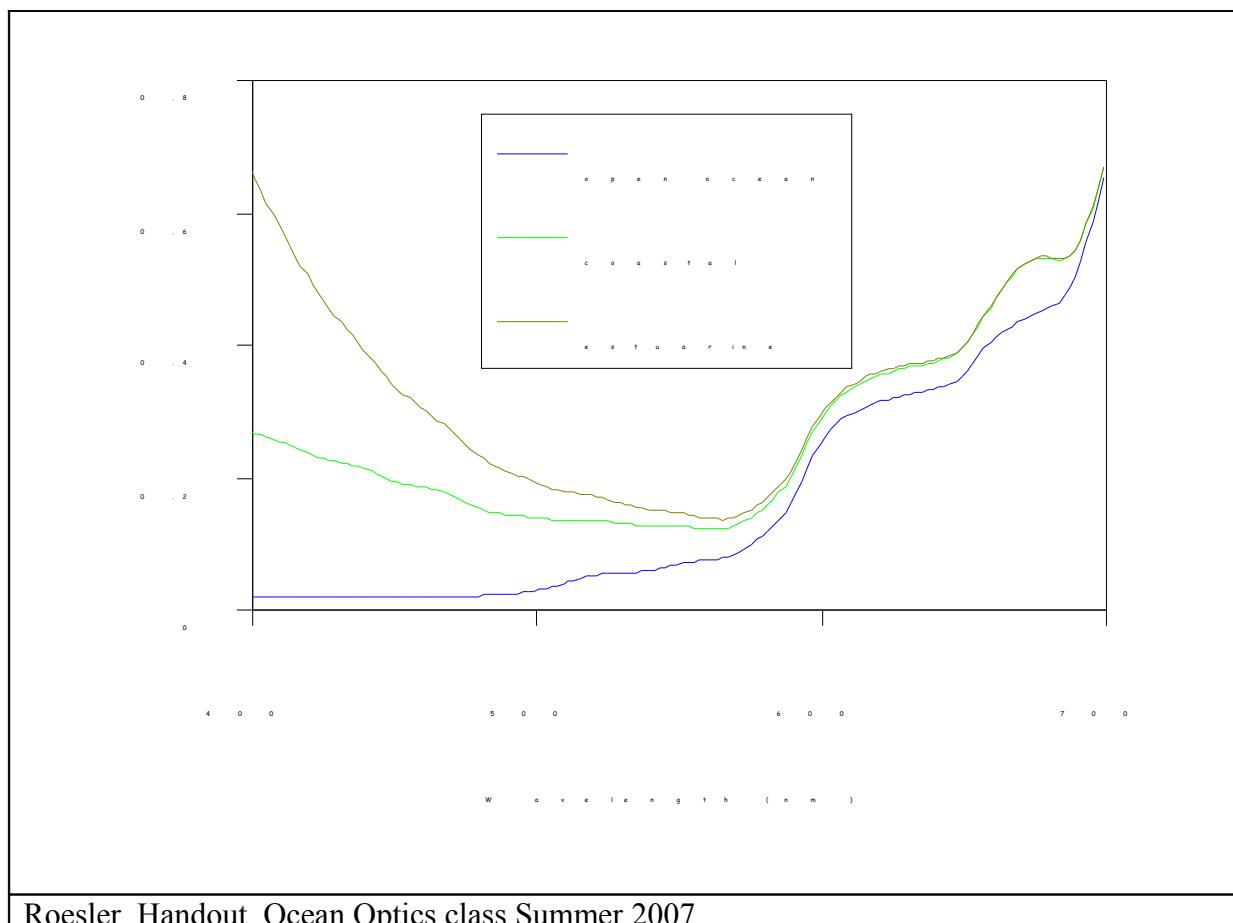
From Sverdrup/Johnson/Pleijel, *The Oceans*,
 ©1942, renewed 1970, p. 113. Adapted by
 permission of Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs,
 New Jersey.

Light Penetration



TRANSMISSION OF LIGHT by water is dependent on the color or wavelength of the light. In clear oceans and lakes (a) the light becomes increasingly monochromatic and blue as its path length increases. In fresh water that carries green organic matter (b) light at all wavelengths is absorbed more quickly than it is in clear water, but the light becomes greener with path length. In rivers, swamps and

marshes that carry large amounts of the products of plant and animal decay (c) absorption is rapid and the spectral distribution of the light shifts to the red. Such waters are called black because the human eye is relatively insensitive to light at long wavelengths; less anthropomorphic name would be infrared water. The depths given for the maximum penetration of light are typical, but they vary widely.



Roesler, Handout, Ocean Optics class Summer 2007

C) Profils verticaux – loi de Beer

Les profils verticaux de lumière (Eo, Ed, Eu, PAR...) peuvent être approximés par une loi exponentielle ou loi de Beer :

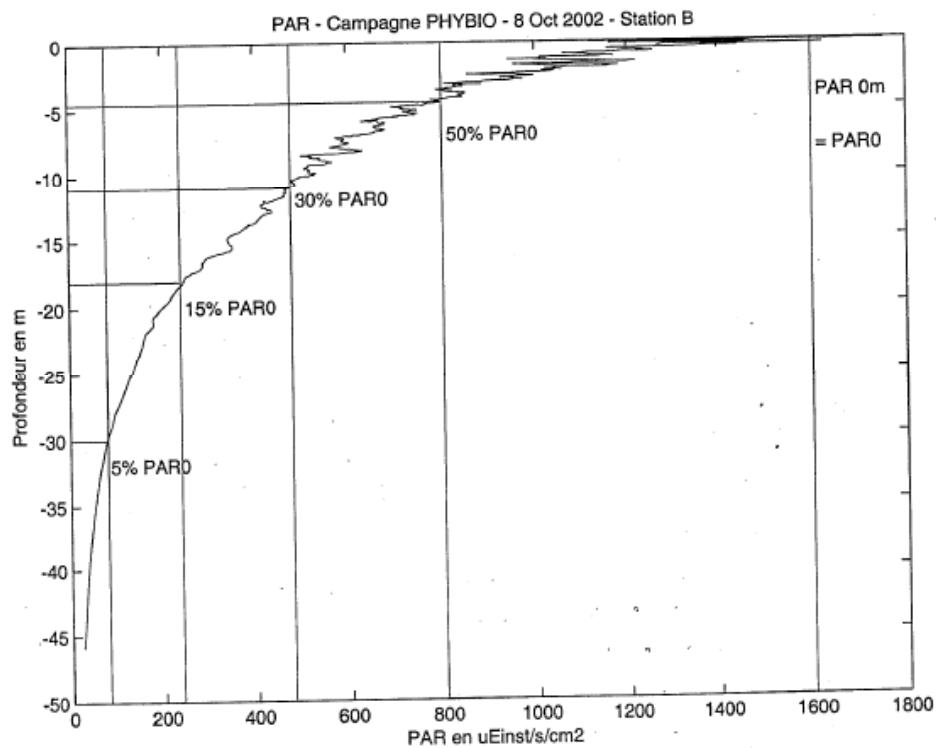
$$E = E(z=0) e^{-kz}$$

Note 1 : C'est seulement une approximation !

Note 2 :

Si on fait infuser un sachet de thé dans une casserole et qu'on le retire ensuite, on a la surprise de voir que l'ajout d'une quantité quelconque d'eau pure n'altère en rien la coloration du liquide, aussi contre-intuitif que cela paraisse. La raison en est que le paramètre de concentration (k) diminue exactement dans les mêmes proportions qu'augmente l'épaisseur à traverser (z).

Cette loi fut découverte par Pierre Bouguer en 1729 et publiée dans son ouvrage *Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumière* (Claude Jombert, Paris, 1729), puis reprise par Johann Heinrich Lambert en 1760 et finalement August Beer en 1852 y introduisit la concentration, lui donnant la forme sous laquelle elle est le plus souvent utilisée.



SECCHI	I50	I30	I15	I5	II	I01
2	0.82	1.42	2.23	3.52	5.42	8.13
3	1.22	2.12	3.35	5.29	8.13	12.19
4	1.63	2.83	4.46	7.05	10.84	16.25
5	2.04	3.54	5.58	8.81	13.54	20.32
6	2.45	4.25	6.70	10.57	16.25	24.38
7	2.85	4.96	7.81	12.34	18.96	28.44
8	3.26	5.67	8.93	14.10	21.67	32.51
9	3.67	6.37	10.04	15.86	24.38	36.57
10	4.08	7.08	11.16	17.62	27.09	40.63
11	4.49	7.79	12.28	19.38	29.80	44.70
12	4.89	8.50	13.39	21.15	32.51	48.76
13	5.30	9.21	14.51	22.91	35.22	52.82
14	5.71	9.92	15.62	24.67	37.92	56.89
15	6.12	10.62	16.74	26.43	40.63	60.95
16	6.52	11.33	17.86	28.20	43.34	65.01
17	6.93	12.04	18.97	29.96	46.05	69.08
18	7.34	12.75	20.09	31.72	48.76	73.14
19	7.75	13.46	21.20	33.48	51.47	77.20
20	8.15	14.16	22.32	35.24	54.18	81.27
21	8.56	14.87	23.44	37.01	56.89	85.33
22	8.97	15.58	24.55	38.77	59.60	89.39
23	9.38	16.29	25.67	40.53	62.31	93.46
24	9.79	17.00	26.78	42.29	65.01	97.52
25	10.19	17.71	27.90	44.05	67.72	101.58
26	10.60	18.41	29.01	45.82	70.43	105.65
27	11.01	19.12	30.13	47.58	73.14	109.71
28	11.42	19.83	31.25	49.34	75.85	113.77
29	11.82	20.54	32.36	51.10	78.56	117.84
30	12.23	21.25	33.48	52.87	81.27	121.90
31	12.64	21.95	34.59	54.63	83.98	125.96
32	13.05	22.66	35.71	56.39	86.69	130.03
33	13.46	23.37	36.83	58.15	89.39	134.09
34	13.86	24.08	37.94	59.91	92.10	138.16

Tableau des profondeurs (en mètres) des niveaux d'éclairement par rapport à la profondeur du disque Secchi (en mètres) donnée dans la première colonne

Chapitre V AOPs

AOP = Propriété Apparente Optique

1) AOPs dans l'eau marine

Il est pratique de définir les **propriétés** d'un milieu pour pouvoir étudier les variations de celles-ci au cours de longues périodes de temps ou comparer le site à d'autres sites d'étude. Il a donc été tenté une même démarche pour la lumière que pour les IOPs. Mais la lumière décroît généralement très vite au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans l'eau et n'est donc pas un paramètre stable.

HydroLight runs: Chl = 1.0 mg Chl/m³, etc
Sun at 0, 30, 60 deg in clear sky, and solid overcast

QuickTime^a et un
dŽcompresseur BMP
sont requis pour visionner cette image.

Ed et Eu dépendent de L et des IOPs de l'eau, mais en plus elles dépendent fortement des conditions extérieures et ne sont pas du tout utiles pour caractériser une masse d'eau (ce ne sont pas des AOPs !)

Par contre il a été observé que la lumière décroît généralement de façon exponentielle avec la profondeur ; ce qui est équivalent à ce que la pente de cette exponentielle soit constante. Du coup la pente du logarithme de la lumière (pentes de $\ln(\text{PAR})$, $\ln(\text{Ed})$ ou $\ln(\text{Eu})$) est une propriété optique (unité : m^{-1}). Cependant, elle ne dépend pas que du milieu, elle dépend évidemment de la lumière elle-même. Du coup cette propriété est, non pas inhérente, mais « apparente »; c'est une AOP : Propriété Optique Apparente.

Le **coeffcient d'atténuation diffuse spectrale K en m^{-1}** (à ne pas confondre avec le coefficient d'atténuation c) est donc défini pour l'éclairement descendant par :

$$K_d(z) = \frac{-d[\ln E_d(z)]}{dz} \quad \text{soit aussi } K_d(z) = -1/E_d(z) \frac{d(E_d(z))}{dz}.$$

Ce coefficient d'atténuation diffuse spectrale dépend évidemment de la longueur d'onde. Il peut aussi être défini pour Eu, PAR etc...

A peu près 90% de la lumière qui quitte la surface de l'eau provient d'une couche d'épaisseur 1/Kd, appelée l' « épaisseur optique » (Gordon & Mc Cluney, 1975 ; Gordon & Morel, 1983). En télédétection, cette épaisseur a une forte importance. Plus il y a de phytoplancton ou de matières en suspension, plus Kd est grand et plus l'épaisseur optique, soit l'épaisseur d'eau « vue » par les satellites est petite.

De même, la **réflectance**, rapport entre éclairement ascendant et éclairement descendant, est généralement assez constante pour une eau donnée et est donc définie comme une AOP :

$$R = \frac{E_u}{E_d} \quad (\text{sans dimension})$$

*Ex - HydroLight runs: Chl = 0.1, 1, 10 mg Chl/m³
Sun at 0, 30, 60 deg in clear sky*

QuickTime^a et un
dZcompresseur BMP
sont requis pour visionner cette image.

R dépend faiblement de l'environnement extérieur, mais fortement des IOPs de l'eau

QuickTime^a et un
d^écompresseur BMP
sont requis pour visionner cette image.

A la suite de l'essor de la télédétection, il a été nécessaire d'introduire la **réflectance de télédétection** (« **remote-sensing reflectance** » en anglais), rapport entre luminance sortant de l'eau (L_w) et éclairement descendant :

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} \quad (\text{unité : sr}^{-1})$$

Un capteur embarqué sur un satellite mesure la « **remote sensing** » réflectance définie par:

$$R_{rs}(0^+, \theta, \varphi) = \frac{L_w(0^+, \theta, \varphi)}{E_d(0^+)}.$$

$L_w(0^+, \theta, \varphi)$ est la luminance diffusée depuis l'intérieur de l'océan dans la direction (θ, φ) .

Le cosinus moyen, noté μ_d , est pour l'éclairement descendant le rapport entre E_d (éclairement descendant « cosinus ») et E_{od} (éclairement descendant scalaire). C'est un facteur sans dimension qui fait partie de la famille des AOPs. Il peut être défini pour E_u ou de façon générale comme :

$$\mu_d = E_d/E_{od}$$

$$\mu_u = E_u/E_{ou}$$

$$\mu = (E_d - E_u)/E_o$$

2) Normalisation de Gordon de Kd – Classification des eaux

Kd normalisé devient une IOP car il ne dépend plus des effets de la mer ou de la lumière. Il correspond à un Kd si le soleil était au zénith, que le ciel était noir (pas de lumière diffuse solaire) et que la mer était plate.

La formule correspondant au Kd normalisé peut être trouvée dans Gordon (1989).

Sinon, Kd est généralement considéré comme un quasi-IOP.

D'ailleurs, la première classification des eaux océaniques dépendait de Kd (Jerlov, 1976). Elle comprenait de nombreuses catégories. Les eaux du large étaient réparties en eaux de cas I, IA, IB, II, et II et les eaux côtières en cas 1, 2, 3, ... 9.

Cette classification a été largement simplifiée par Morel et Prieur en 1977 qui ne distinguent plus que deux cas. En effet, en général, en plein milieu de l'océan, le phytoplancton ainsi que son matériel détritique associé (aussi bien particulaire que dissous) sont les constituants optiquement actifs les plus importants. On considère dans ce cas que la concentration en phytoplancton permet de calculer la concentration en produit dérivé. Cela n'est pas le cas près des côtes ou au large d'un panache de fleuve : les sédiments et substances dissoutes contribuent indépendamment à la variabilité des propriétés optiques. Ces deux situations sont distinguées comme eaux de cas 1 et eaux du cas 2 :

EAUX DU CAS I		EAUX DU CAS II	
1. Phytoplancton <i>en concentration variable</i>		5. Sédiments remis en suspension <i>depuis le fond (près des côtes ou dans les zones peu profondes)</i>	
2. Débris associés <i>issus du broutage du zooplancton et de dégradation naturelle</i>		6. Particules terrigènes <i>provenant des rivières ou des glaciers</i>	
3. Matière organique dissoute <i>libérée par le phytoplancton et ses débris</i>		7. Matière organique dissoute <i>produite par érosions et lessivages des sols</i>	
4. Poussières éoliennes <i>transportées depuis les déserts par l'atmosphère</i>		8. Apports anthropogéniques	

Table 1-1. D'après Gordon et Morel (1983). Classification des principaux constituants optiquement actifs, en fonction de leur présence dans les eaux du cas I et du cas II. Les poussières éoliennes ne font théoriquement pas partie des eaux du cas I. Leur présence, épisodique, est une source d'anomalie des modèles bio-optiques habituels aux eaux du cas I.

Morel (1988) établissait le lien entre concentration de chlorophylle et la classification des eaux types de Jerlov.

type	I	IA	IB	II	III
chlor	0-0.01	0.05	0.1	0.5	1.5-2

Austin et Petzold (1986) donnaient une classification quantitative qui permettait, à partir des eaux types de Jerlov, d'en déduire les Kd.

3) Autres relations pour Kd et R

Divers modèles de Kd peuvent aussi être trouvés :

$$Kd(\lambda) = (a(\lambda) + b_b(\lambda)) / \cos \theta_{sw} \quad \text{Gordon, 1989}$$

θ_{sw} est l'angle solaire par rapport au zénith

En général a est plus grand que b_b , donc Kd peut être considéré comme le rapport de $a / \cos \theta_{sw}$.

Morel (1988) a aussi travaillé sur le Kd et proposé une formulation dépendant de la concentration en chlorophylle (voir référence sur le site web du LOV, Laboratoire de Villefranche sur mer).

En raisonnant que $R(z=0)$ serait directement proportionnel à la rétrodiffusion bb et par contre inversement proportionnel à l'absorption a , des études (Gordon, 1975 ; Morel et Prieur, 1977) se sont concentrées sur l'obtention de la relation liant ces paramètres. Finalement, la formulation clef qui reste la plus citée est :

$$R(0) = 0.33 b_b / a$$

Profondeur de pénétration

$$I_z = I_0 * \exp(-k * z)$$

Coefficient K is called “attenuation coefficient”; it is measured in 1/m.

The value $1/K$ is called “attenuation length”, and the layer of this length is called “penetration depth” (Z_{pd})

Another depth used in ocean optic is “euphotic depth” (Z_e); it is defined as the depth where the PAR (Photosynthetically Active Radiation) is reduced to 1% of its value at the surface.

Le calcul théorique par rapport à ces deux définitions donnent la relation suivante: $Z_{pd} \approx Z_e / 4.6$.

Mais bien évidemment cette relation peut varier dans le temps et l'espace cette relation doit être prise avec précaution .

