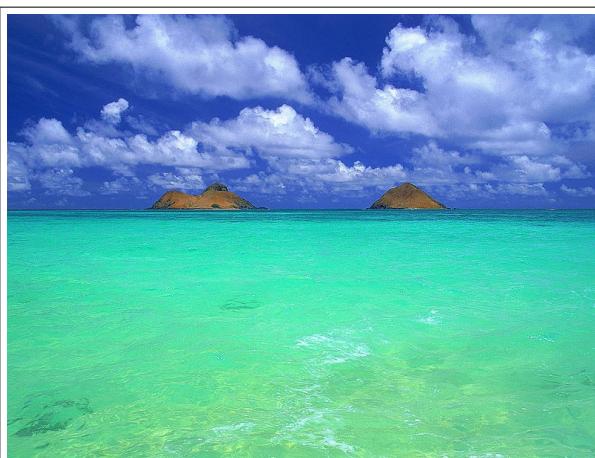


Chapitre IV – Lumière à travers la colonne d'eau

Introduction - Quelle est la couleur de la mer ? de l'océan ?



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. Mais la mer peut aussi prendre d'autres couleurs en fonction des conditions d'éclairement, éventuellement de la nature du fond et des caractéristiques de la côte, 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, si le fond n'est pas visible, des propriétés d'absorption et de diffusion de la molécule d'eau H₂O 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 ?

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. Au contraire de satellite, il a été observé des « blooms blancs » de coccolithophoridés, la couleur étant due cette fois à la diffusion de la calcite.



Les eaux du large sont bleues. Plus on est près de la côte et plus elles sont vertes, jaunes.

A) Interface air/mer

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

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

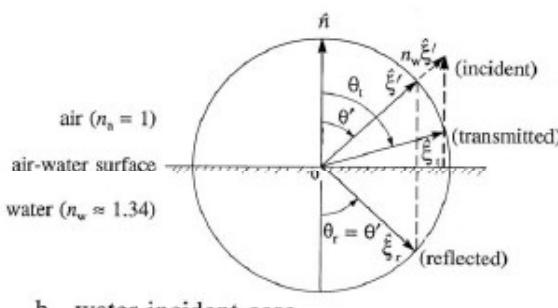
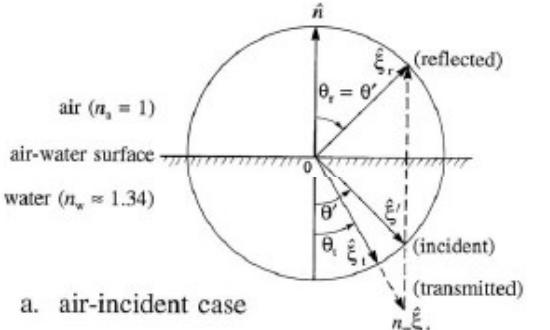
Si l'on considère l'interface air/mer, un rayon incident venant de l'air va avoir un rayon transmis dans l'eau avec un angle θ_r inférieur à l'angle incident puisque l'indice de réfraction de l'eau est plus grand que celui de l'air. Un rayon venant de l'air pourra donc toujours « entrer » dans l'eau.

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 $\theta_i = \text{Arc sin} \left(\frac{n_{air}}{n_w} \right)$, 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 (pour un photon!).



- Gauche
Rayons
a) cas incident coté air
b) incident coté eau

Ci-dessous
variation du paramètre $r = Ar/Ai$
(Voir section 6 du premier chapitre) suivant $n_w = 1.367$ pour le bleu et $n_w = 1.329$ pour le rouge (voir section sur l'indice de réfraction) en fonction de l'angle d'incidence

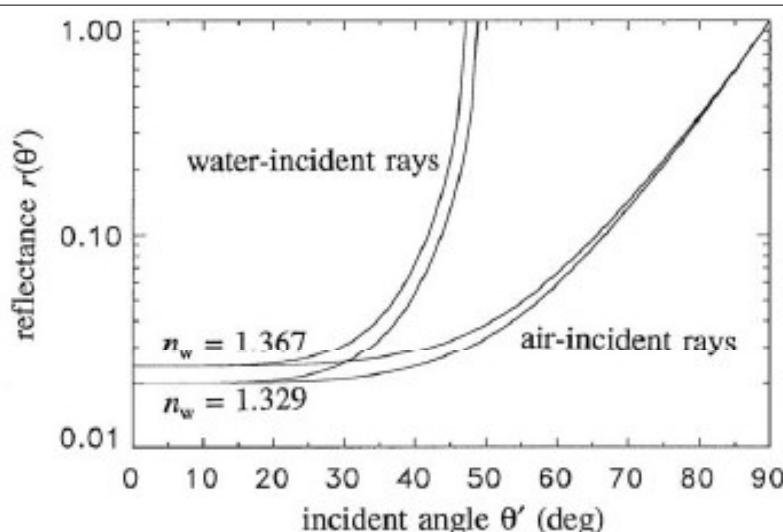


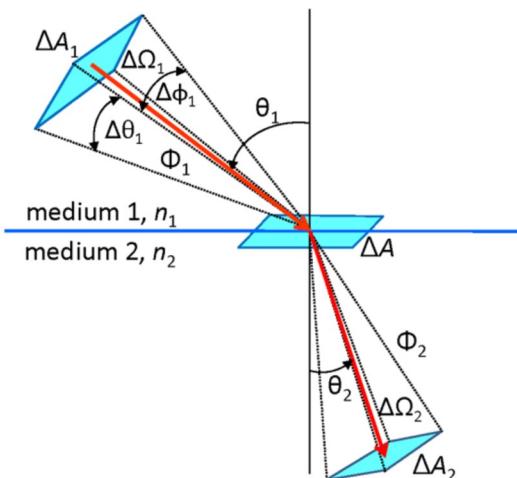
Fig. 4.3. Behavior of the Fresnel reflectance function of Eq. (4.14) for the extreme values of the real index of refraction n_w encountered in hydrologic optics.

Extra matériel : Loi des radiances

La loi de Snell donne un résultat important qui régit la façon dont la luminance non polarisée change lorsqu'on passe d'un milieu à un autre, par exemple, lors de la traversée d'une surface air-eau. La figure montre deux faisceaux de rayonnement, un incident sur une interface et celle transmise. Soit L_1 le rayonnement incident dans le milieu 1 défini par l'énergie $\Delta \Phi_1$ en passant par une zone ΔA_1 normale à la direction de propagation du photon et contenu dans un angle solide

$\Delta \Omega_1 = \sin \theta_1 \Delta \theta_1 \Delta \phi_1$, où θ_1 est l'angle polaire mesuré par rapport à la normale à la surface et $\Delta \phi_1$ est la largeur de l'angle solide dans la direction azimutale. De même, L_2 est le rayonnement transmis dans le milieu 2 défini par les quantités correspondantes comme illustré. L'angle azimutal ne change pas lors du franchissement de la surface, alors

$\Delta \Omega_2 = \sin \theta_2 \Delta \theta_2 \Delta \phi_2$. L'énergie incidente et transmise passent à travers un espace commun ΔA à l'interface.



(Source:

http://www.oceanopticsbook.info/view/surfaces/the_level_sea_surface)

avec T_F coef de transmission défini par : $\Delta \Phi_2 = T_F \Delta \Phi_1$,

$$\text{on peut démontrer que : } \frac{L_2}{n_2^2} = T_F \frac{L_1}{n_1^2}$$

Bien que l'énergie soit conservée lors du franchissement d'une frontière, la luminance change par un facteur proportionnel à la variation de l'indice de réfraction au carré. Ceci est une simple conséquence de la modification de l'angle solide résultant de la variation de θ . Notez que pour une incidence normale et $n_w = 1,34$ et $T_F \approx 0,979$, **la luminance juste au-dessous de la surface de l'eau est $0,979 * (1,34)^2$, soit environ 1,76 fois la luminance dans l'air.** A l'inverse, lors du passage de l'eau à l'air, la luminance de l'eau est réduite par un facteur de 1,76 pour donner la luminance dans l'air.

(voir

http://www.oceanopticsbook.info/view/surfaces/the_level_sea_surface
pour la démonstration)

Dans la mesure où les pertes dues à absorption et à la diffusion hors du faisceau peuvent être ignorées (parfois une bonne approximation pour la transmission atmosphérique, mais presque jamais le cas dans l'eau), la luminance divisée par le carré de l'indice de réfraction est constante le long de tout chemin . Ce résultat a même été appelé **le théorème fondamental de la radiométrie**, ce qui est peut paraître un peu surfaçait, étant donné que de véritables faisceaux de lumière perdent toujours de l'énergie dû à l'absorption et peuvent perdre ou gagner du rayonnement en raison de la diffusion.

Enfin, notez que cette loi avec n^2 s'applique uniquement à la transmission de la luminance. **Lors d'une simulation de Monte Carlo de photons** (voir chapitre VI), dans laquelle le rayonnement peut être estimé avec le suivi de rayons des photons émis, aucun facteur n^2 n'est appliqué à l'énergie des photons suivis. En effet, l'effet n^2 est automatiquement intégré dans chaque estimation de la propagation de photon comme les directions des photons individuels sont calculées par la loi de Snell.

Pour convertir les Ed et PAR en surface à Ed et PAR au-dessous de la surface, il faut se référer à Mobley et Boss (2012). En bref, le résumé de leurs résultats est :

La moyenne journalière nette d'éclairement $Ed(0-)_24$ et $PAR(0-)_24$ entrant dans l'océan est approximativement de 5% à 20% inférieure à celle de l'air $Ed(\text{air})_{24}$ incidente sur la surface de la mer. La quantité exacte qui pénètre dans l'eau dépend principalement de la latitude, du jour de l'année, de la vitesse du vent et du ciel.

Ils ont donc mis au point des fichiers faciles à appliquer de fonctions de transmission de surface convertissant les valeurs moyennes journalières au-dessus de la surface en valeurs juste en dessous de la surface: $Ed(0-)_24$ et $PAR(0-)_24$. Ces valeurs peuvent ensuite être utilisées pour initialiser les modèles optiques pour une propagation ultérieure en profondeur. Ces fichiers de données, utilisés pour créer les figures de leur article, peuvent être téléchargés à partir du site http://www.oceanopticsbook.info/view/radiative_transfer_theory/level3.

Voir figure page suivante

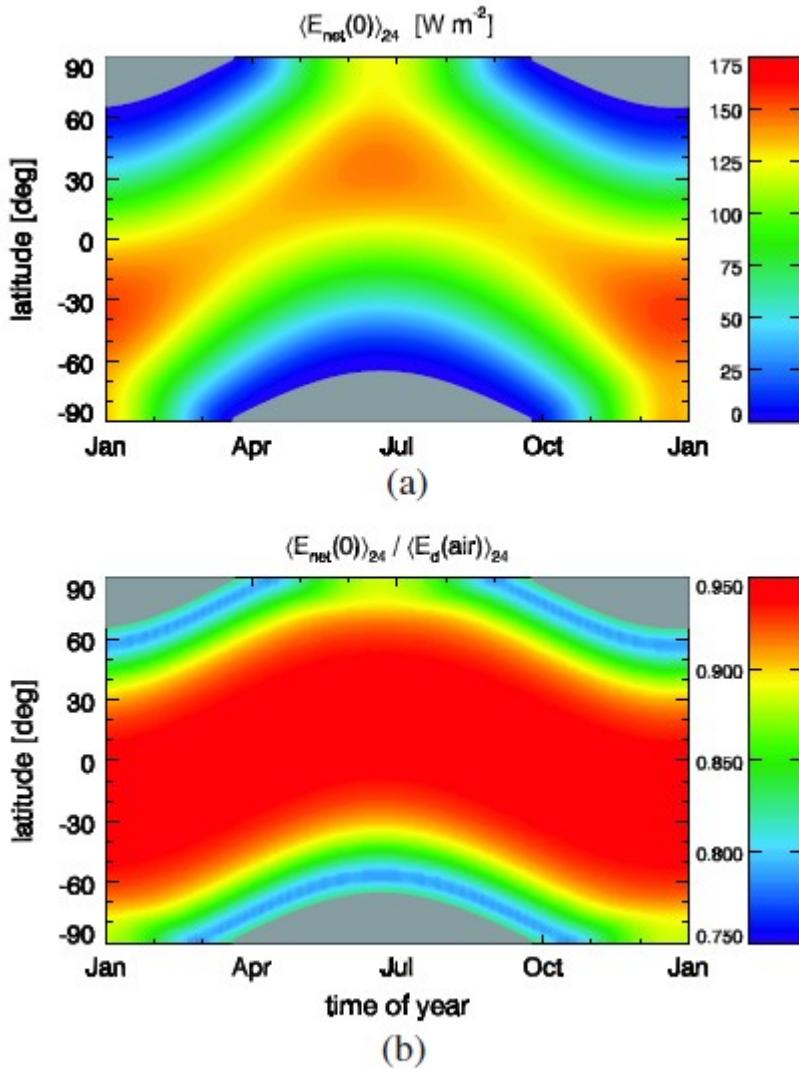


Fig. 10. (a) In-water $\langle E_{\text{net}}(0) \rangle_{24}$ corresponding to Fig. 9(a).
(b) Surface transmission factor that converts $\langle E_d(\text{air}) \rangle_{24}$ into $\langle E_{\text{net}}(0) \rangle_{24}$.

Il faut donc bien savoir si le PAR de surface est un PAR instantané ou un PAR quotidien (PAR₂₄) ; les deux sont très différents, voir Lee (2009) et Wei et Lee (2013).

Interface non plane

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.

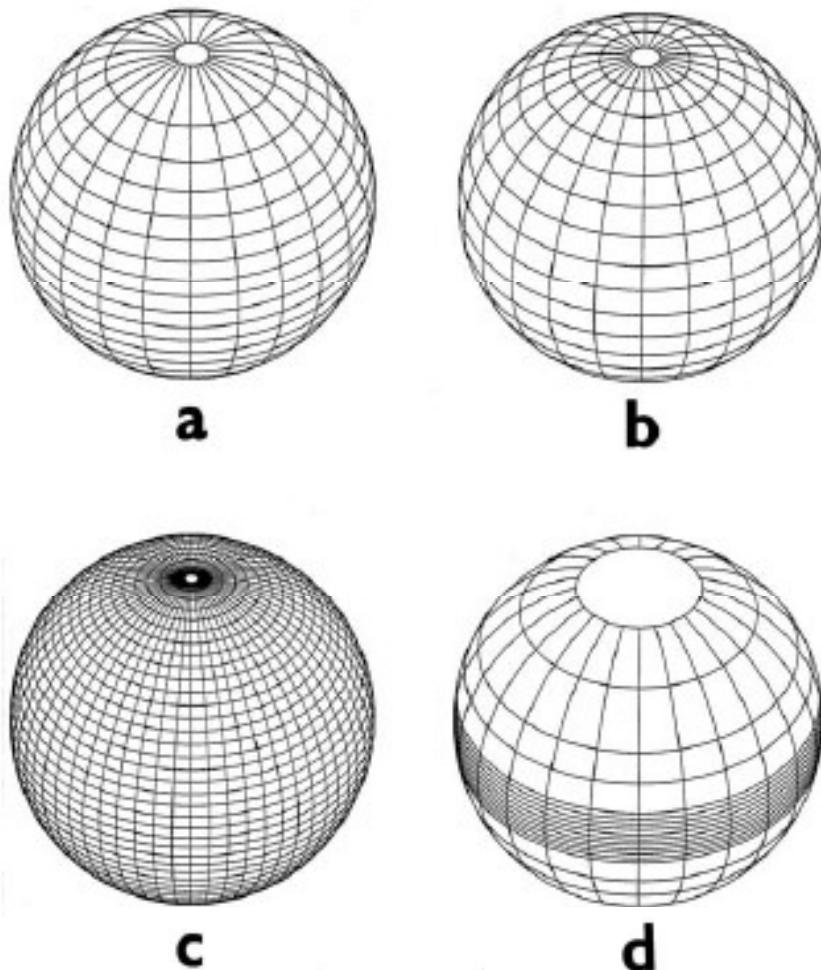


Fig. 4.19. Further examples of partitions of the unit sphere into quads. (a) $m = 10$ μ -bands and $n = 12$ ϕ -bands, with all solid angles Ω_{pq} and Ω_m equal. (b) $m = 10$ and $n = 12$, with all $\Delta\theta$ values equal. (c) $m = 23$, $n = 30$, with equal $\Delta\theta$ values, so that $\Delta\theta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

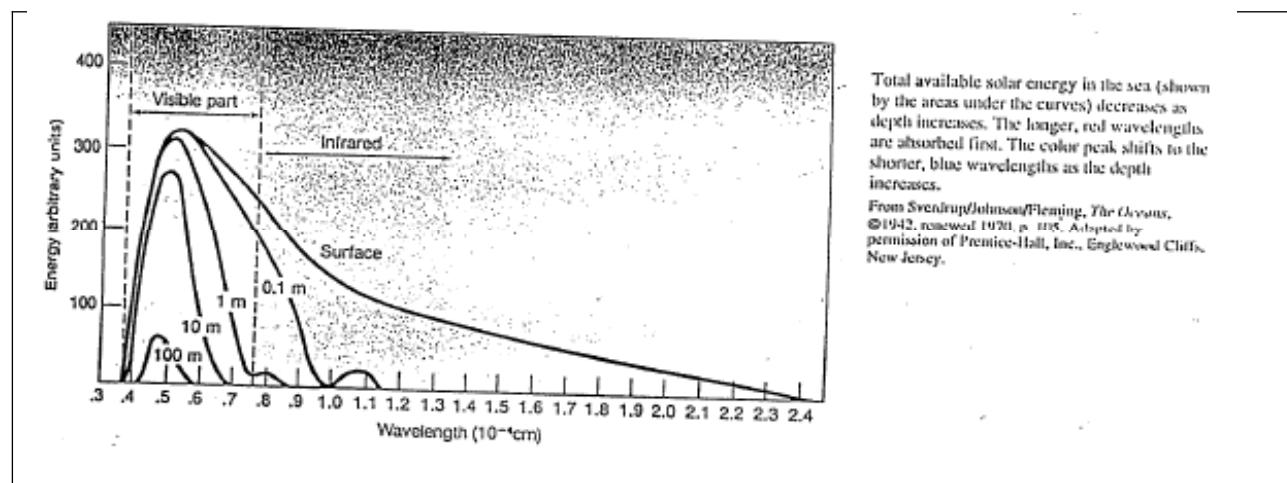
B) Devenir de la lumière dans l'eau

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

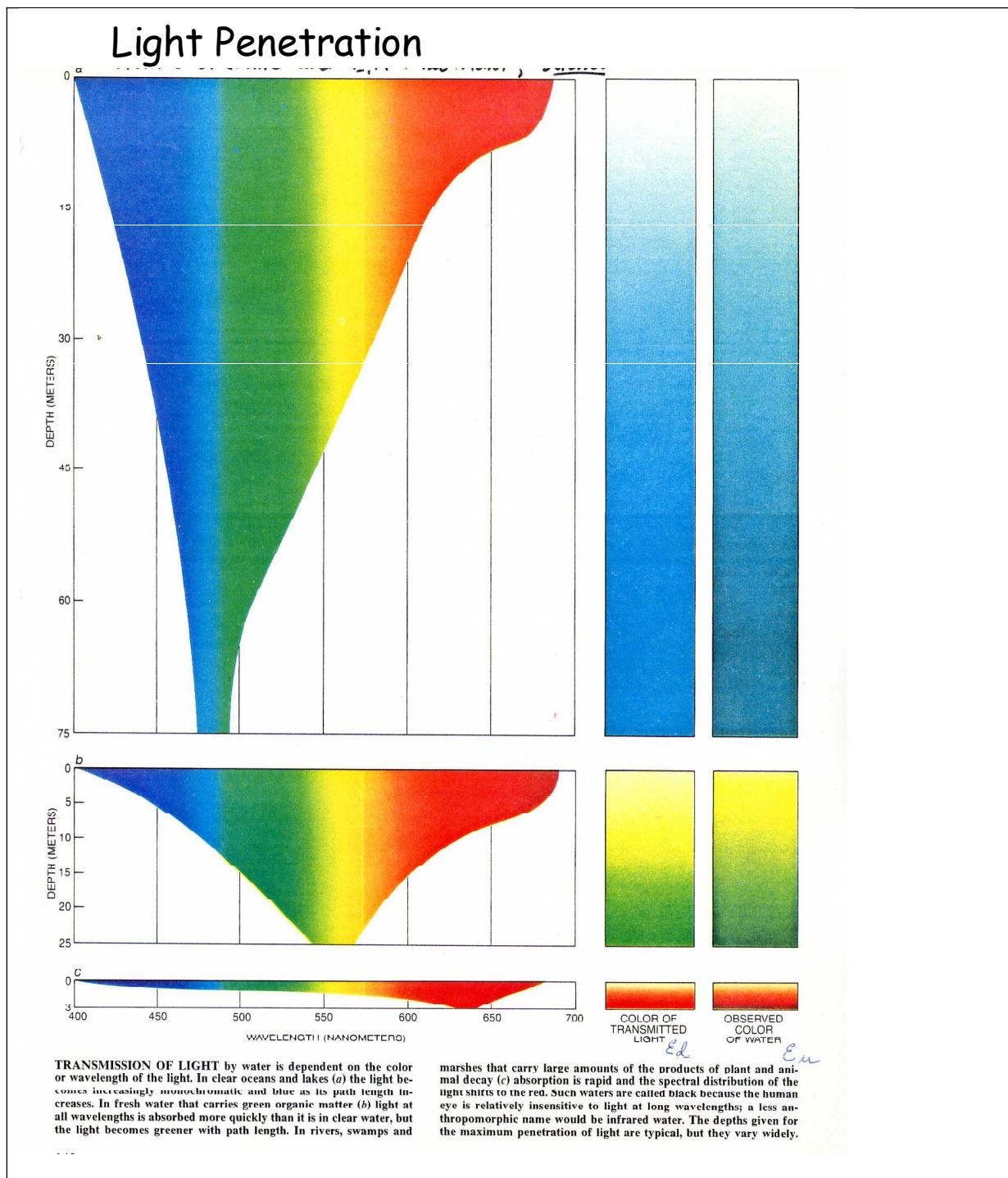
- plus on s'enfonce, plus le chemin parcouru par la lumière est long, donc plus la lumière diminue (soit par absorption, soit par diffusion). Donc il existe de moins en moins d'énergie électromagnétique venant du soleil plus la profondeur augmente
- la disparition de la lumière dépend de ce qu'il y a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

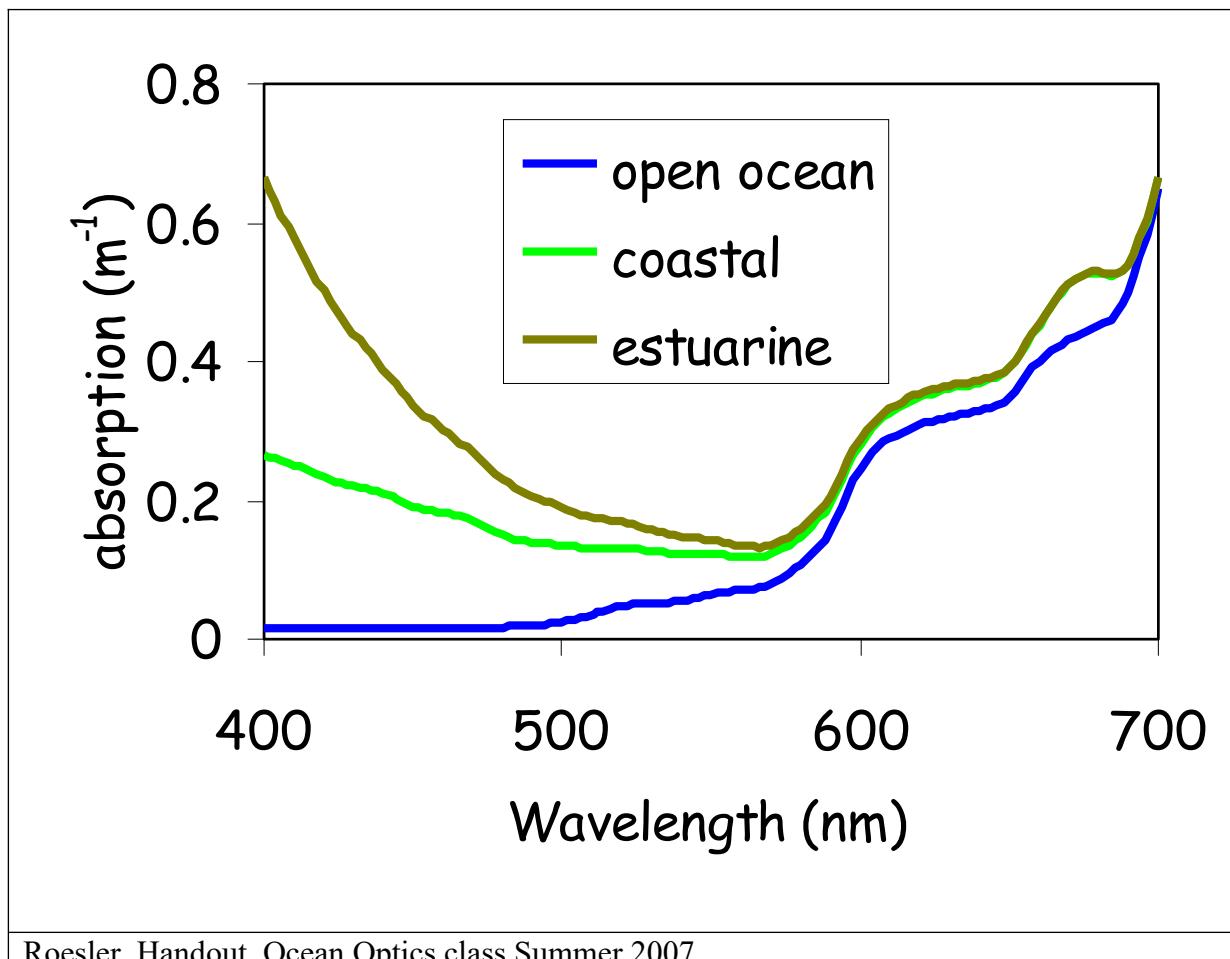
Dans tous les cas, la lumière a tendance à devenir monochromatique avec la profondeur.

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 ».



Cette pénétration de la lumière est en « opposé » par rapport aux spectres d'absorption des composantes de l'eau.





Roesler, Handout, Ocean Optics class Summer 2007

C) Profils verticaux – loi de Beer-Lambert

(historique : Bouguer 1729, Lambert 1760, Beer 1862)

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

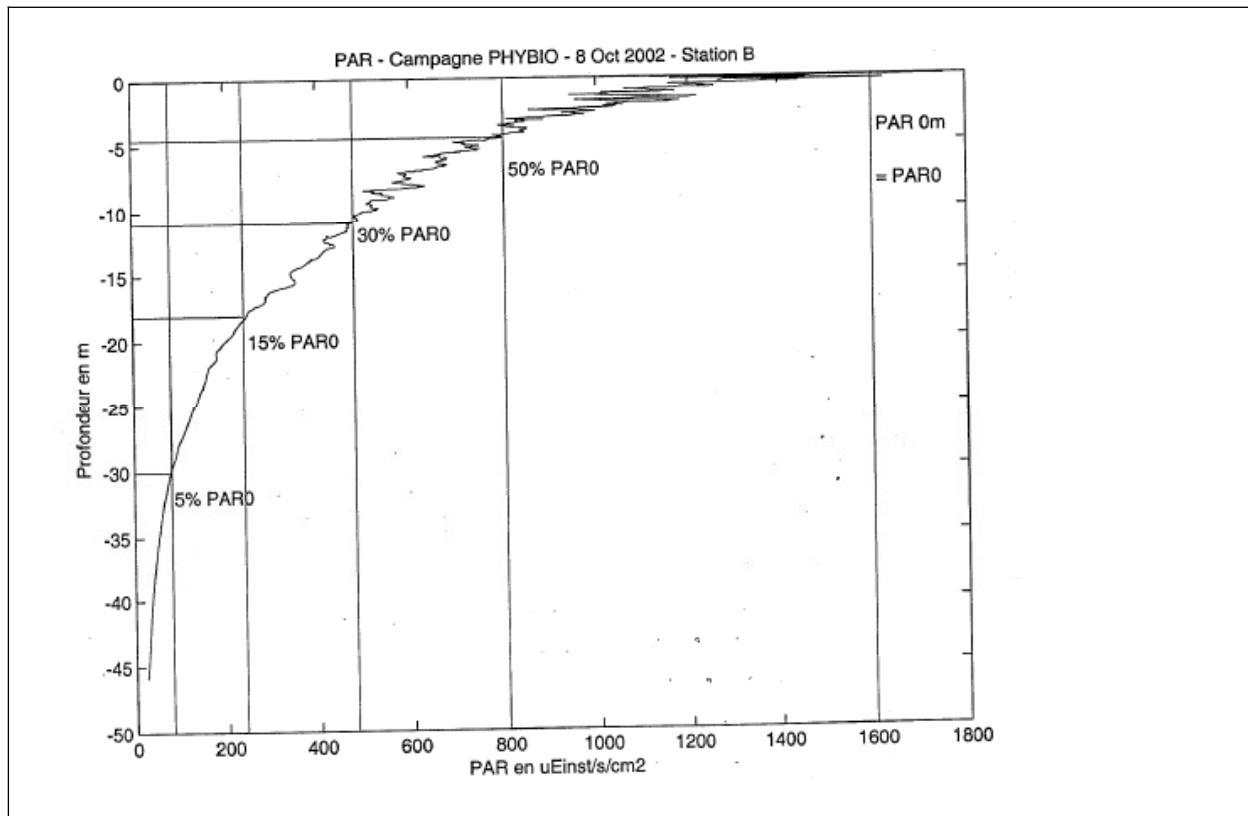
$$E = E(z=0) e^{-kz}$$

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.

Avant la disponibilité d'instruments mesurant les profils en temps réel de l'éclairement solaire (exemple le plus répandu, la mesure du PAR voir graphe ci-dessous), les océanographes, en particulier les biogéochimistes ayant besoin de savoir quel degré d'éclairement correspondait à la profondeur à laquelle ils relevaient des échantillons à faire incuber, utilisaient la table du disque de Secchi (voir page suivante et explication dans le cours OPB201).



SECCHI	I50	I30	I15	I5	I1	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

