

4.2 Mesure satellitaire de la couleur de la mer : l'expérience CZCS

par H. DEMARCO*

* Océanographe de l'ORSTOM, Centre de Recherches Océanographiques de Dakar Thiaroye, BP 2241, Dakar (Sénégal)

1. CARACTERISTIQUES DU SATELLITE ET DU CAPTEUR

Le capteur multispectral CZCS (Coastal Zone Color Scanner) a été embarqué sur le satellite NIMBUS-7. Ce dernier a été lancé en 1978 et est resté opérationnel jusqu'en 1986. Le capteur CZCS possède six canaux dont quatre dans le domaine visible, un dans le proche infra-rouge et un dans l'infra-rouge moyen (voir tableau 1). Les principales caractéristiques du satellite sont :

- orbite : héliosynchrone
- altitude d'observation : 955 km
- champ instantané : 0.0495 degré
- largeur du pixel au nadir : 825 m
- nombre de pixels par ligne : 1968
- largeur du champ balayé : 79 degrés, soit 1 566 km

Le capteur possède en outre la particularité de pouvoir incliner le plan de balayage jusqu'à 20 degrés de la verticale dans le sens de la marche afin d'éviter la réflexion spéculaire du soleil. Cet angle d'inclinaison est appelé le *tilt* du capteur.

Tableau 1 : caractéristiques des 6 canaux CZCS

2. TRAITEMENT DES DONNEES CZCS

2.1 Caractéristiques du signal mesuré

Le signal mesuré par le capteur dans le domaine visible est une luminance spectrale. Cette dernière s'exprime en $\mu\text{W.cm}^2.\text{str}^{-1}.\text{nm}^{-1}$. Elle est notée L_λ et représente la partie du rayonnement solaire réfléchi montant vers le capteur pour la bande spectrale considérée.

2.1 Calibration des données et correction de dérive

Le signal électrique est numérisé à bord du satellite et codé en comptes numériques (CN) sur 8 bits, de 0 à 255, avant d'être retransmis à la station de réception avec les paramètres orbitaux. Les comptes sont transformés en luminances spectrales (L_λ) par une relation linéaire de calibration établie pour chaque canal du capteur avant le lancement, de la forme :

$$L_\lambda = \text{CN}_\lambda * S_\lambda * F_\lambda + I_\lambda$$

S_λ et I_λ sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de calibration. F_λ est un terme de correction supplémentaire estimé ultérieurement prenant en compte une décroissance progressive de sensibilité du capteur pour chaque canal.

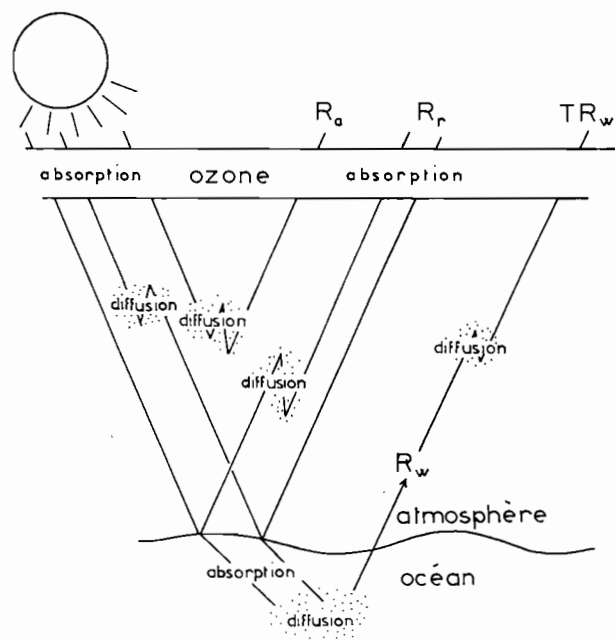


Figure 1. Représentation schématique de la décomposition du rayonnement reçu par le capteur.

La luminance étant une grandeur dépendant des conditions d'éclairage local, elle est transformée en réflectance spectrale suivant la formule :

$$R(\theta_o, \Phi_o, \theta, \Phi) = \pi \cdot L_\lambda(\theta, \Phi) / (E_{o\lambda} \cdot \cos \theta_o)$$

où θ_o , Φ_o , Φ et θ sont les angles zenitaux et azimutaux respectivement solaire et de visée, et $E_{o\lambda}$ l'éclairage solaire instantané. La réflectance spectrale, indépendante des conditions d'éclairage, représente le rapport de l'éclairage solaire ascendant sur l'éclairage solaire descendant. La réflectance totale peut se décomposer en trois termes :

$$R_{tot} = R_r + R_a + tR_w$$

qui représentent les contributions respectives de la réflectance due à la diffusion Rayleigh des molécules d'air, de celle due à la diffusion des aérosols atmosphériques (vapeur d'eau et poussières), et enfin de la réflectance issue de l'eau, qui nous intéresse (figure 1). Cette dernière est en effet modifiée sélectivement en fonction de la longueur d'onde par son parcours dans l'eau, en fonction de la concentration de l'eau de mer en ses divers constituants (matières minérales en suspension, pigments chlorophylliens du phytoplancton, substances dissoutes).

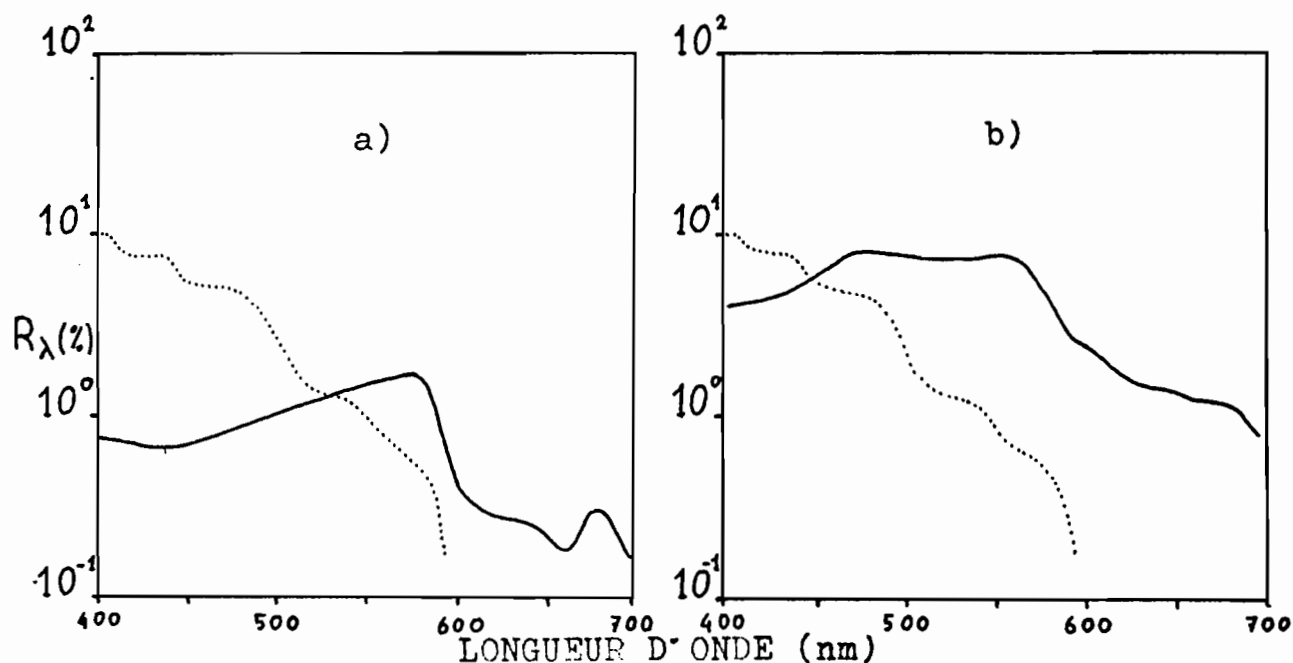


Figure 2. Exemples de variations spectrales de la réflectance issue de l'eau, R (%) mesurée in situ :
 a) dans une eau de mer ne contenant que du phytoplancton
 b) dans une eau de mer contenant essentiellement des matières minérales particulières en suspension en pointillés : spectre de réflectance de l'eau de mer pure
 D'après Sathyendranath et Morel, 1981.

2.2 Correction atmosphérique

Elle consiste en l'extraction du terme R_w de la réflectance totale. Le seul paramètre dont l'estimation n'est pas immédiate est le terme R_a , réflectance due à la diffusion par les aérosols, la nature de ces derniers étant encore mal connue, surtout en zone intertropicale. Le terme R_a est estimé à partir du canal 4 (rouge) de CZCS pour lequel la réflectance issue de l'eau, R_w , est généralement très faible et considérée comme nulle. Il est ensuite possible, connaissant la valeur de R_a pour le canal 4 et en faisant certaines hypothèses sur le type d'atmosphère, d'extrapoler les termes R_a et donc de calculer la réflectance de l'eau R_w pour les canaux 1 à 3.

2.3 Redressement géométrique

L'image de réflectance est ensuite redressée géométriquement. Comme pour tout satellite à défilement, deux possibilités de redressement sont offertes :

- par détermination d'amers et calcul d'un polynôme de déformation;
- par utilisation directe des paramètres orbitaux, ou d'une grille de localisation calculée à partir de ces derniers et accompagnant les données.

2.4 Propriétés optiques et classification des eaux de mer

La réflectance issue de l'eau peut s'exprimer par une relation simple : $R_w = 0.33 b_b/a$, où b_b et a sont les coefficients de rétrodiffusion et d'absorption totaux de l'eau de mer. Ces derniers se décomposent par additivité des coefficients élémentaires b_{bi} et a_i des constituants présents dans l'eau de mer à une concentration C_i , sous la forme :

$$a = a_w + c_i a_i$$

$$b_b = b_{bw} + c_i b_{bi}$$

Les particules minérales en suspension sont caractérisées par une diffusion importante dans l'ensemble du spectre visible et une absorption faible, ce qui confère à l'eau de mer turbide une réflectance élevée dans l'ensemble du spectre visible (figure 2). Au contraire, les pigments chlorophylliens du phytoplancton provoquent une absorption importante à 443 nm, pic d'absorption de la chlorophylle a, et une diffusion négligeable. Il en résulte une réflectance plus faible à 443 nm que dans le reste du spectre (figure 3), et d'autant plus faible que la concentration en chlorophylle est importante.

Ces propriétés servent de base à des classifications optiques des eaux de mer. La plus utilisée est celle de Morel. Il distingue des eaux du cas 1 pour lesquelles l'activité du phytoplancton possède une action prédominante sur les propriétés optiques de l'eau et où ne figurent pas d'autres substances que celles provenant de cette activité. Les eaux du cas 2 sont caractérisées par la présence, même à faible dose, de sédiments marins et particules terrigènes en suspension ou de substances dissoutes, associées ou non à une activité phytoplanctonique.

2.5 Algorithmes de détermination des constituants marins

Leur élaboration découle directement des propriétés précédentes d'absorption et de diffusion de chaque constituant de l'eau de mer, mais aussi de l'appartenance de cette dernière aux catégories optiques définies plus haut.

Plusieurs algorithmes de détermination de la concentration en pigments chlorophylliens ont été proposées

Tableau 1 : caractéristiques des 6 canaux CZCS

n° canal	λ Centrale (nm)	Largeur (nm)	Rapport signal/bruit (radiance entrée en mW. cm ² .ster ⁻¹ . μm ⁻¹)
1	443	20	150 jusqu'à 5,41
2	520	20	140 jusqu'à 3,50
3	550	20	125 jusqu'à 2,86
4	670	20	100 jusqu'à 1,34
5	750	100	100 jusqu'à 10,8
6	11 500	2 000	0,220°K à 270°K

par différents auteurs. Ils sont généralement définis à partir des valeurs de la réflectance de l'eau (R_w) dans les canaux 1 et 2 ou 2 et 3, suivant la gamme de concentration mesurée. Ils sont de la forme :

$$C \text{ mg/m}^3 = a(R_w(\text{canal 1 ou 2})/R_w(\text{canal 3}))^b$$

La teneur en particules, minérales ou non, contenues en suspension dans l'eau de mer (habituellement déterminée par filtrage) peut également être en partie estimée à partir de la réflectance de l'eau dans le canal 3.

REFERENCES

Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W., Brown O.B., Evans R.H., Breenkow W.W., 1983. Phytoplankton pigments concentrations in the middle atlantic bight : comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Optics*, 22, 20.

Jerlov N.G., 1976. *Marine Optics*, Elsevier scientific oceanography series, 14, Elsevier Amsterdam, 2nd ed., 203 p.

Morel A., Prieur L., 1977. Analysis of variations in ocean color, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 4.

Platt T., Herman A.W., 1983. Remote sensing of phytoplankton in the sea : surface layer chlorophyll as an estimate of water-column chlorophyll and primary production, *Int. J. Remote Sensing*, 4, 2, 343-351.

Sathyendranath S., Morel A., 1981. Light emerging from the sea: interpretation and uses in remote sensing.

Sturm B., 1981a. Ocean color remote sensing and quantitative retrieval of surface chlorophyll in coastal waters using NIMBUS-7 CZCS data, *Oceanography from space*, J.F. Gower ed., Plenum Publish Corp., 267-279.

Viollier M., 1980. *Téledétection des concentrations en seston et pigments chlorophylliens contenus dans l'océan*. Thèse d'état, 503, Univ. Lille I.

Yentsch C.S., Phinney D.A., 1982. The use of the attenuation of light by particulate matter for the estimate of phytoplankton chlorophyll with reference to the CZCS. *J. Plankton Res.*, 4, 93-102.