



**OPTIQUE MARINE ET TELEDETECTION**  
**OPB 303**  
**Marseille - Octobre 2012**

**REMOTE SENSING OF PHYTOPLANKTON FUNCTIONAL GROUPS**  
**METHOD AND APPLICATIONS**

**Dr Severine Alvain**  
*LOG- CNRS-ULCO-Lille1, Wimereux, France*

# WHO AM I ?

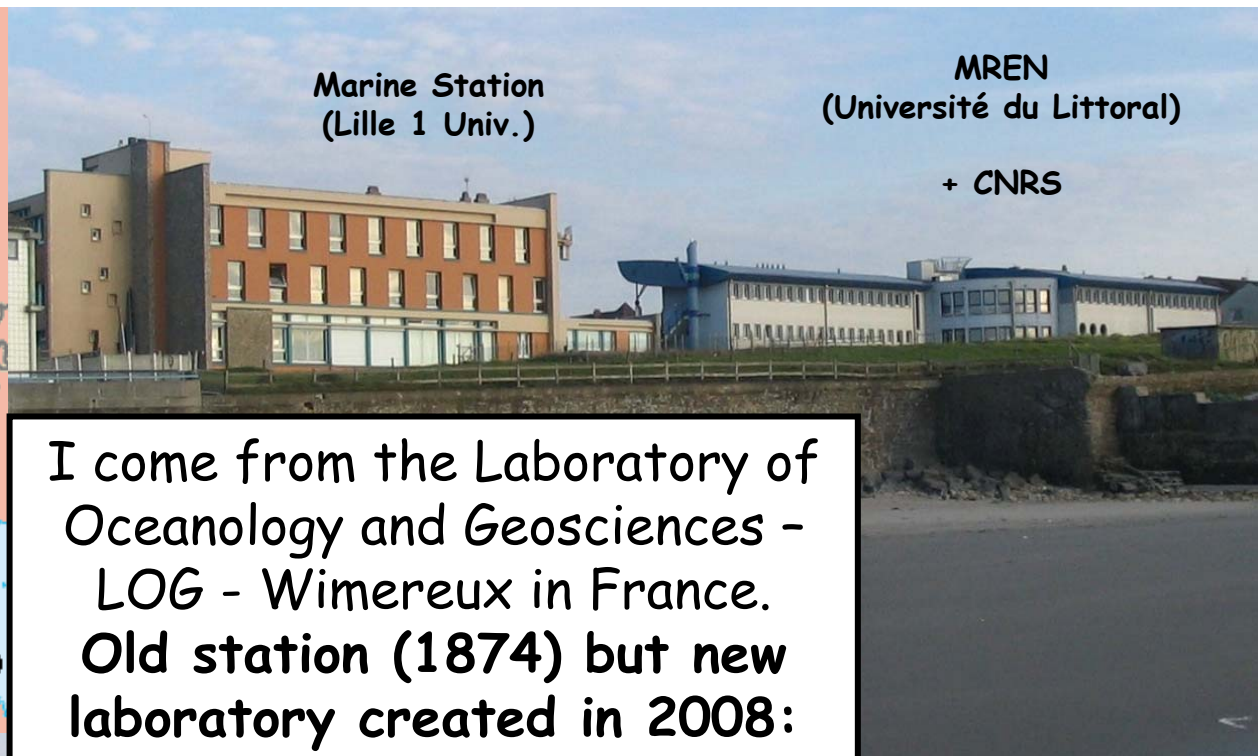
Séverine ALVAIN

I received my Ph.D. in physics and remote sensing from Paris university in 2005.

I'm working on detection of dominant phytoplankton groups from remote sensed measurements. During my Ph. D., I have established the PHYSAT method which has shown, for the first time, that remote sensed observations can be used to detect some phytoplankton groups from space.

I have now a permanent position as a researcher at the Centre National de la Recherche Scientifique in the "Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences" of Wimereux, located in the northern coast of France.





I come from the Laboratory of Oceanology and Geosciences - LOG - Wimereux in France. Old station (1874) but new laboratory created in 2008:  
*36 researchers • 30 PhD students • 100 members*



Natural and preserved seaside

#### Activities :

- *Research*
- *Teaching*
- *Hosting (students, researchers)*
- *Observation*

#### Very close to the sea:

- *sampling / observation / cultures*

<http://log.univ-littoral.fr/>





# Télédétection : Depuis quand ? Et comment ?

1858 : Photos depuis des ballons. Gaspard-Félix Tournachon, dit Nadar, 1820-1910 à Paris, caricaturiste, aéronaute et photographe français.



14-18 : Développement de la photo aérienne



# Télédétection : Depuis quand ? Et comment ?

39-45 : Développement des radars, avec passage dans le civil dans les années 50.

Années 60 : Infra-rouge + course entre les deux blocs US / URSS, programme Apollo : fortes avancées du côté des lanceurs et moyens de traitement.



*Salle lancement premier satellite  
météo Américain - Avril 1960*

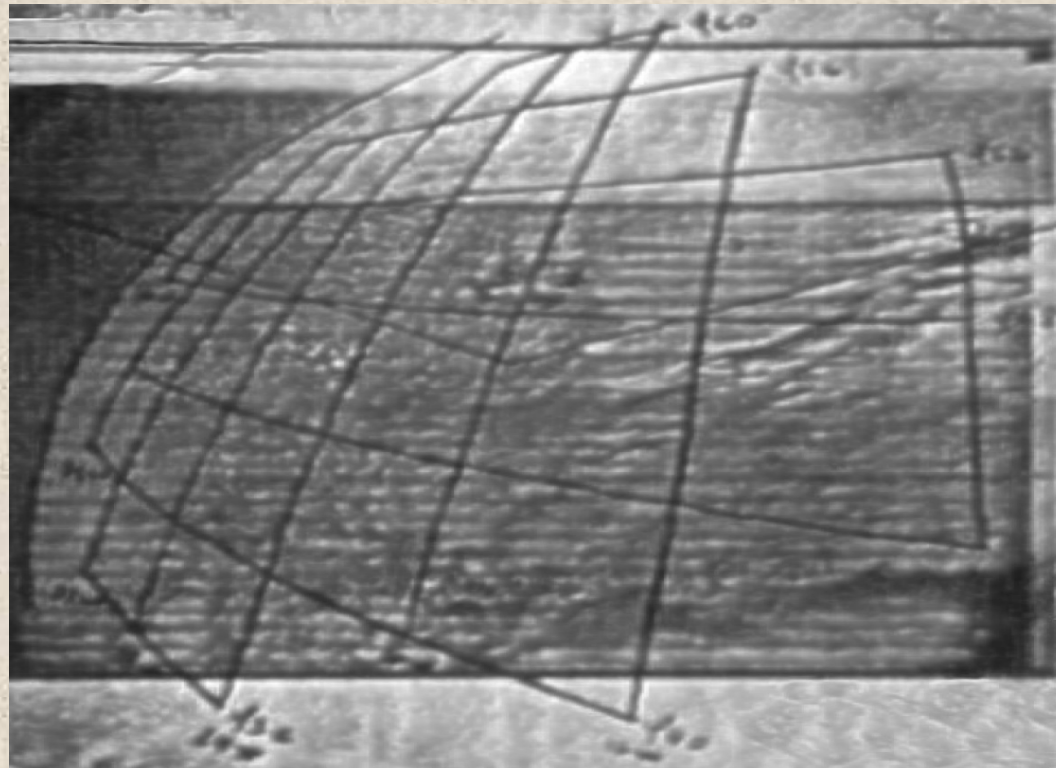


# Télédétection : Depuis quand ? Et comment ?

**1963**

Au Centre de météorologie spatiale nouvellement créé à Lannion, une image transmise par le satellite météorologique américain Tiros 8 est reçue pour la première fois.

*Première photo satellite au CEMS (Centre d'Etudes météorologiques spatiales) : 24 décembre 1963 à 12 H 29 UTC, canal visible*



"Collecting and interpreting data on some properties of something by a recording device not in physical contact with it."



Field measurements



Airplane, or balloon

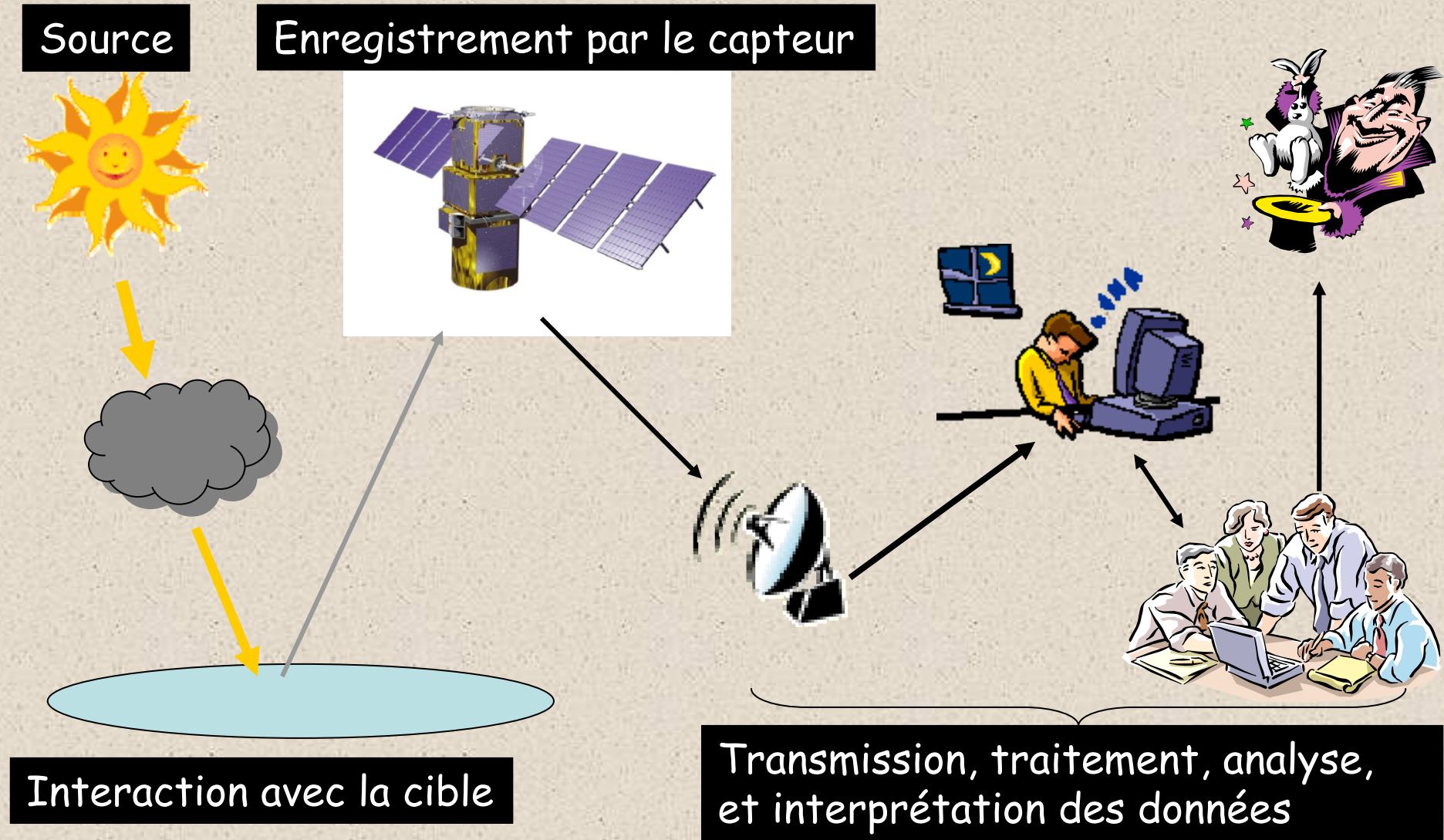


Satellite



# Télédétection: implique de multiples étapes

9

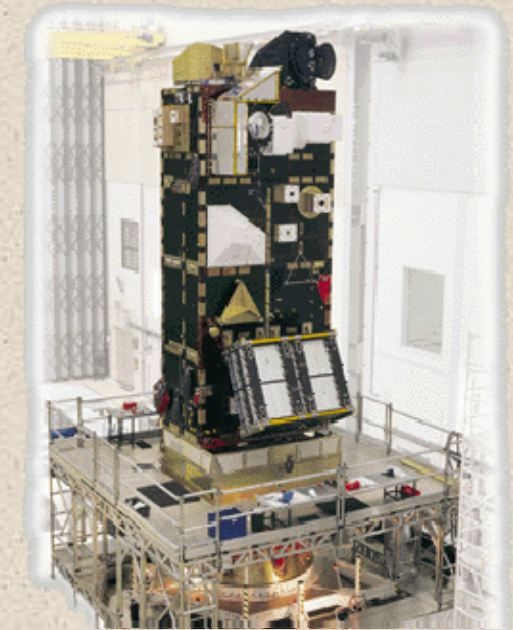


# Les plate-formes spatiales

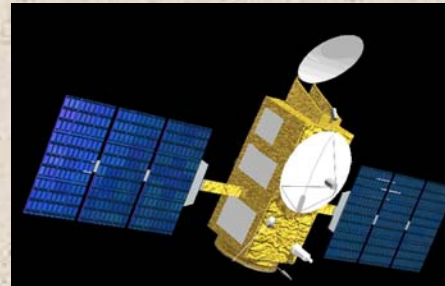
- Plate-formes multi-missions
  - 2 à 8 t
  - Plusieurs instruments
  - Durée de vie de 3 à 7 ans
- Mini-satellites
  - ~ 500 kg
  - 1 à 3 instruments
  - Durée de vie ~ 3 à 5 ans
- Micro-satellites
  - ~ 50 à 100 kg
  - 1 instrument
  - Durée de vie 1 à 2 ans



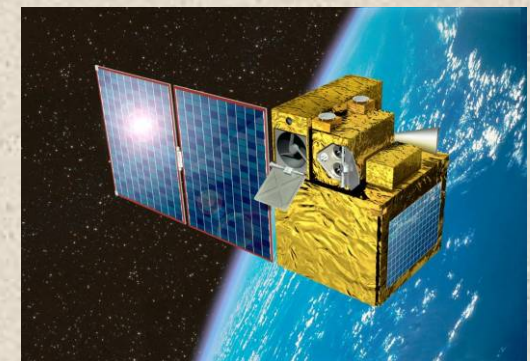
ADEOS



ENVISAT



JASON



PICARD

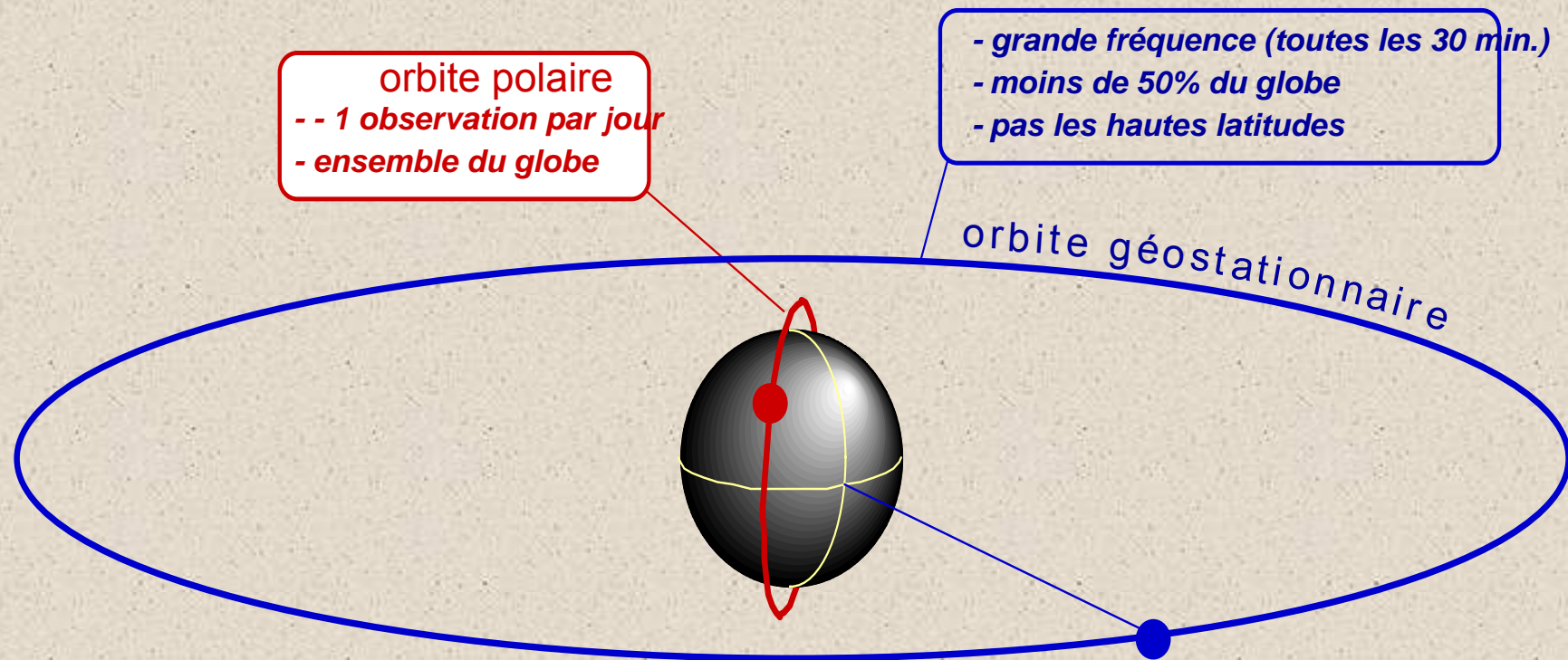


# Pourquoi faire ?



- Imagerie
- Couverture spatiale
- Homogénéité des mesures

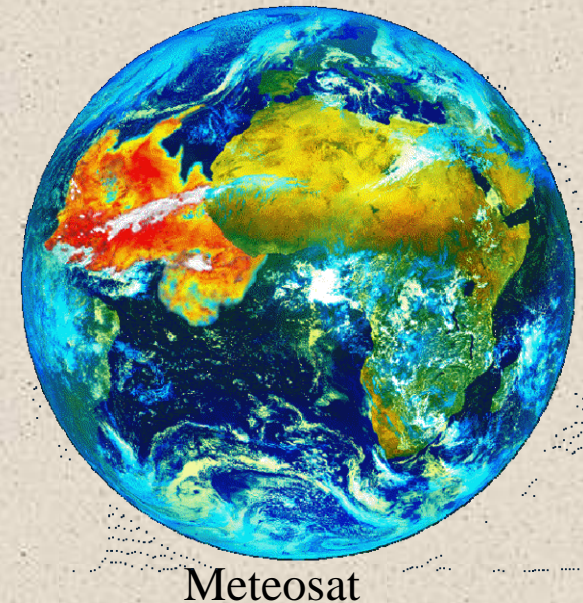
# Orbites basses ou géostationnaires



- Basses : 400-1000 km. Généralement polaires
- Géostationnaires : 36000 km. Au dessus de l'équateur

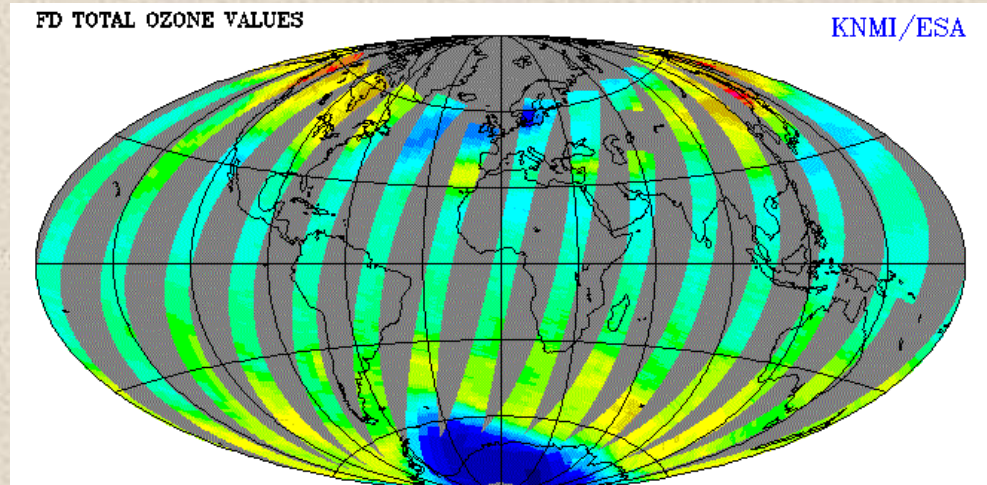


## Zone couverte par les Géostationnaires



- Très bonne résolution temporelle ( $\approx 30$  minutes)
- Une portion du globe observée
- Pas d'observation des pôles

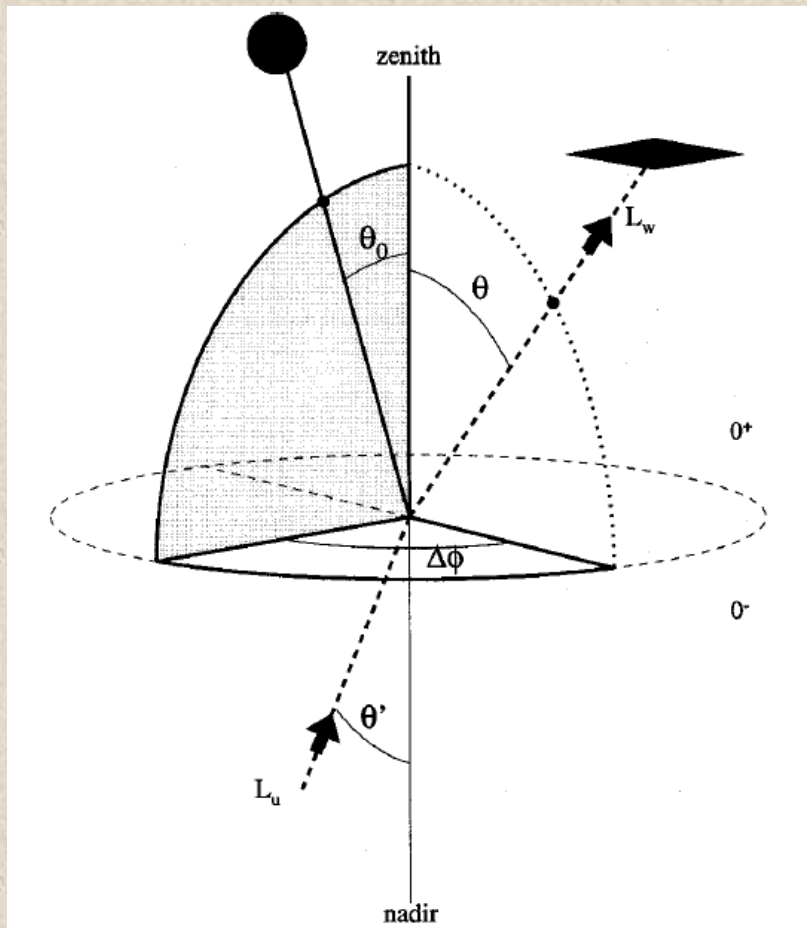
# Orbite Polaire



- Toutes les zones de la Terre peuvent être observées par un seul satellite
- 2 observations par jour (nuit+jour)
- L'inclinaison est adaptée pour obtenir une orbite héliosynchrone : heure d'observation constante.



# Geometry of observation



Source zenith Angle:  $\theta_0 [0, \pi/2]$

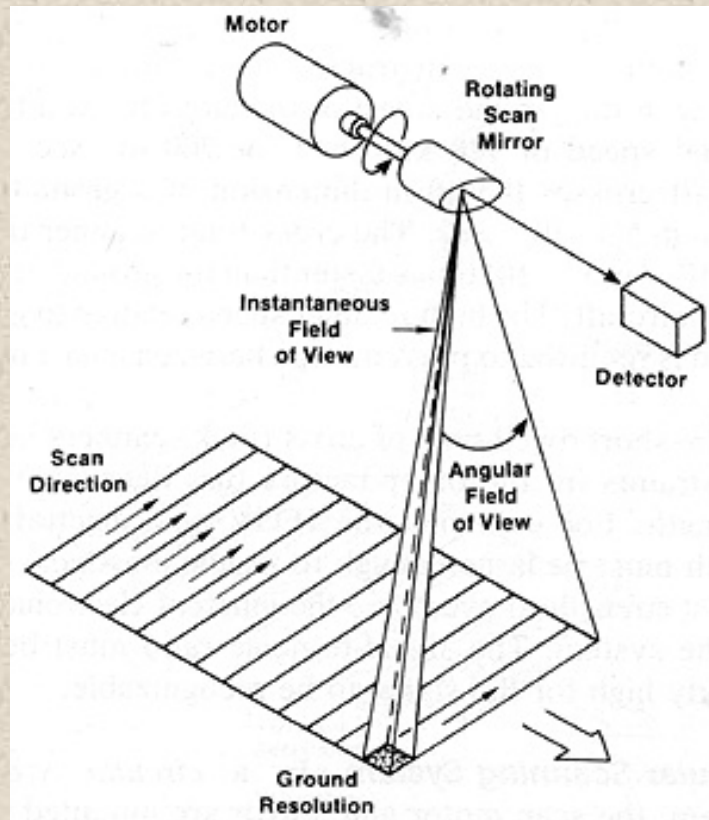
Zenith viewing angle:  $\theta [0, \pi/2]$

Azimuth angle:  $\Delta\phi [0, 2\pi]$

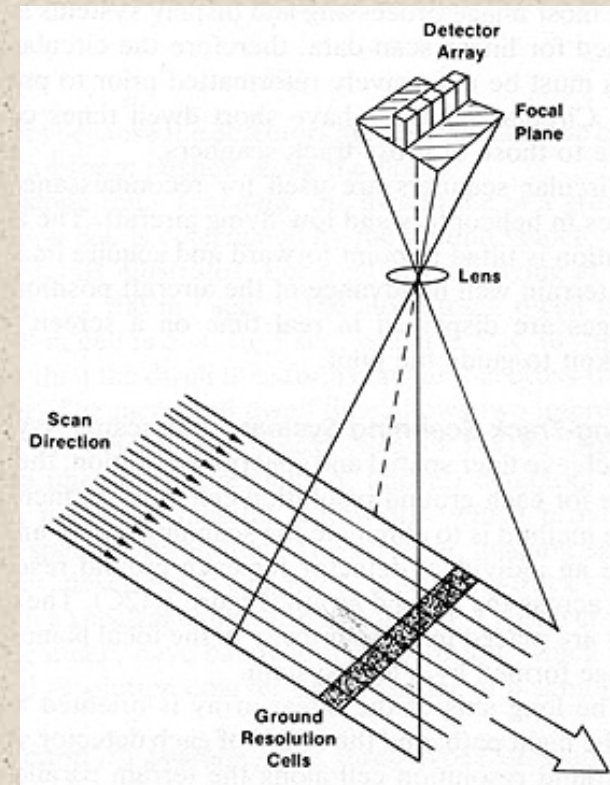
From Loisel and Morel, IJRS, (2001)

# Schematic diagrams of data acquisition by:

## Whiskbroom scanner



## Pushbroom scanning



The **WK** records a two dimensional imagery using a combination of the motion of the platform and a rotating or oscillating mirror scanning perpendicular to the flight direction.

The **PS** is a scanner without any mechanical scanning mirror but with a **linear array** of solid semiconductive elements which enables it to record one line of an image simultaneously.

*From Sabins, Jr., F.F., Remote Sensing: Principles and Interpretation, W.H. Freeman*



# Classification of sensors

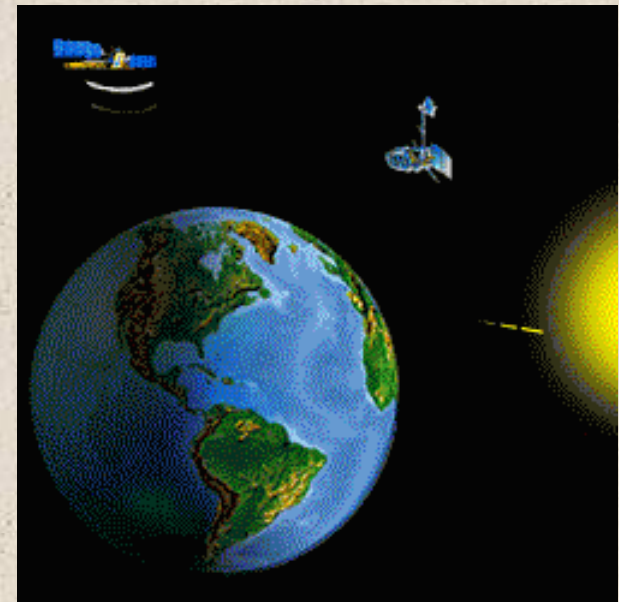
**Passive sensors:** measure levels of energy that are naturally emitted, reflected, or transmitted by the target object (sun is generally the source; and these sensors record the reflected and/or emitted (NIR) radiations). Some PS can operate at night (in the NIR).

**Active sensors:** provide their own energy source for illumination of the target (radar, lidar, scatterometer). AS can operate at night, and over clouds cover areas.

## Remarks:

Sensors which only records the sun energy reflected by the hearth, can only record images while observing the sunlit side of the Earth.

*source: <http://ccrs.nrcan.gc.ca>*



# Résolution spatiale, temporelle et spectrale..

La résolution spatiale: la taille des pixels des images satellites couvrant la surface terrestre.

La résolution temporelle: fréquence d'acquisition pour un point donné

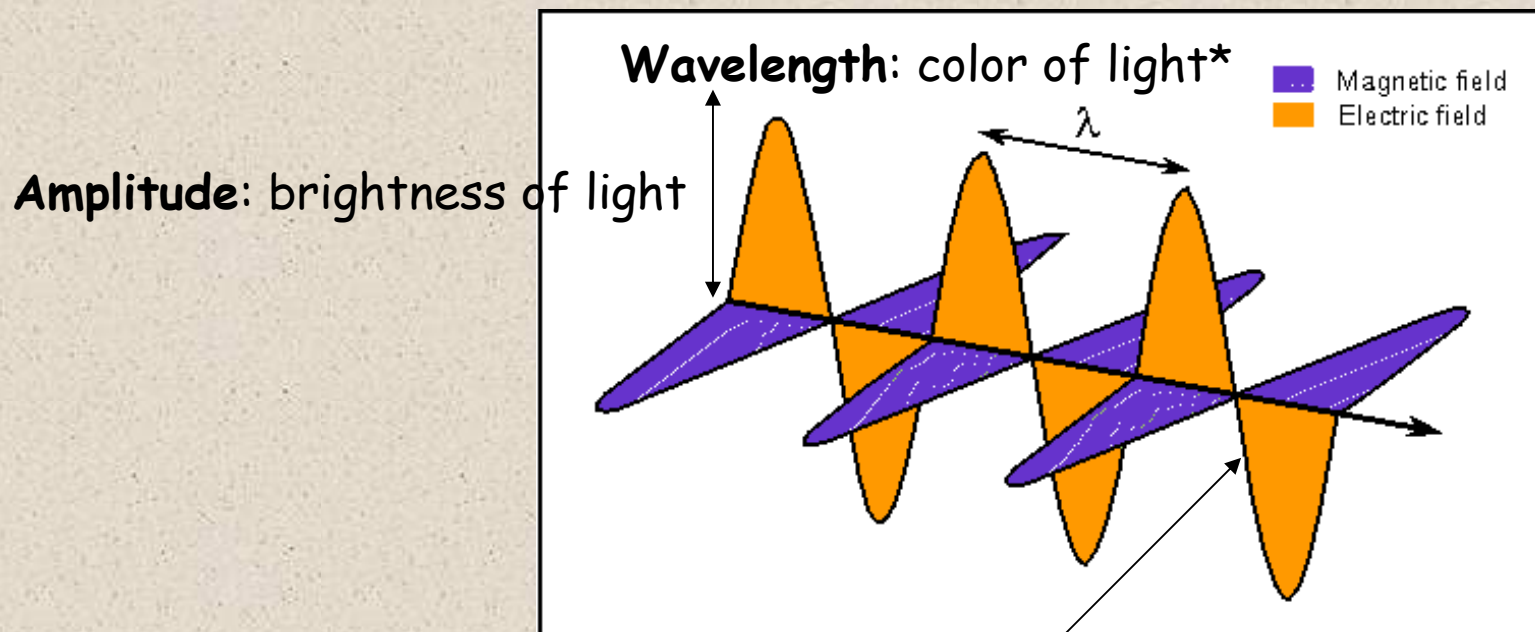
La résolution spectrale: largeur de bandes des radiations électromagnétiques pour les différents canaux utilisés



# Que mesure t-on ? Electromagnetic Radiation (EMR)

## The dual nature of EMR:

Consists of **waves** of energy associated with electric and magnetic field resulting from the acceleration of an electric charge.



**Polarization:** direction of the electric light field

*\*Where light is only a part of the electromagnetic spectrum*

# Electromagnetic Radiation (EMR)

## The dual nature of EMR:

Consists of **particles (photons)** with no mass, and which are packets ("quanta") of energy which move at the speed of light.

❖ Energy contained in each photon: **color of the light**

$$E = h \nu = h c / \lambda \text{ (in the vacuum)}$$

$c$  is the speed of light ( $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )

$h$  is the Plank's constant ( $6,626068 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ )

❖ Number of photons: **brightness of the light**

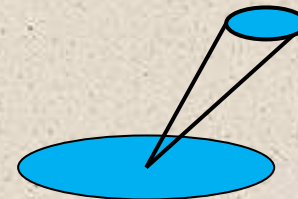
❖ Four numbers (X, Y, Z and T): **polarization**



# Eléments de radiométrie appliqués à la télédétection

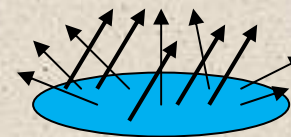
*La cible étudiée peut soit émettre des radiations (luminance, émittance) soit être illuminée par une source (irradiance)*

Luminance ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ):  $L(\theta, \theta_0, \Delta\phi, \lambda)$



Emittance ( $\text{Wm}^{-2}$ ):  $M(\lambda)$

$$M = \int_{\text{half space}} L \cos\theta d\Omega$$



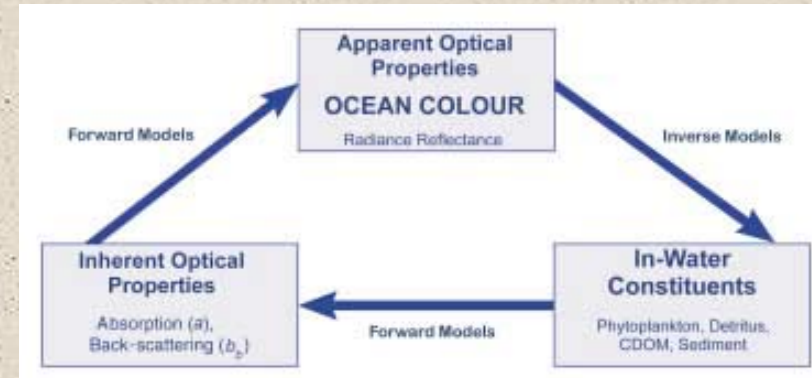
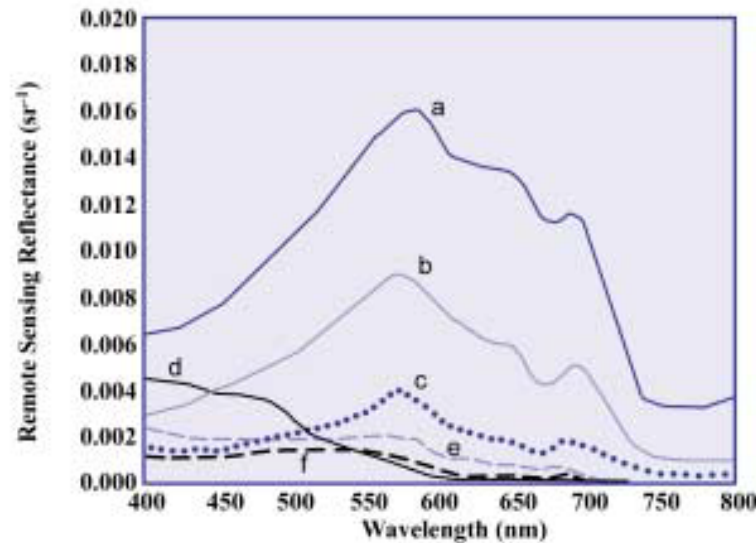
Eclairement descendant ( $\text{Wm}^{-2}$ ):  $E_d(\lambda)$

$$E_d(\theta_0, \lambda) = \int_{\Xi_d} L(\theta_0, \theta, \Delta\phi) \cos\theta d\Omega$$



"Remote Sensing Reflectance" ( $\text{sr}^{-1}$ ):  $R_{rs} = L / E_d$

# Généralités



La réflectance de surface  $R_{rs}(\lambda)$  dépend de la rétrodiffusion et de l'absorption des différents composés optiquement actifs de l'eau de mer:

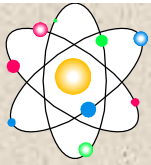
$$R(\lambda) = G \cdot b(\lambda) / a(\lambda)$$

ou  $G$  représente un paramètre qui dépend de l'éclairement incident.

→ La **réflectance marine** n'est pas le produit final mais la précision de son estimation conditionne la qualité des produits couleur de l'eau

→ Nécessité de développer des **modèles d'inversion de la  $R_{rs}$**  pour obtenir les paramètres d'intérêt





Rayons-gamma

# Le spectre électromagnétique



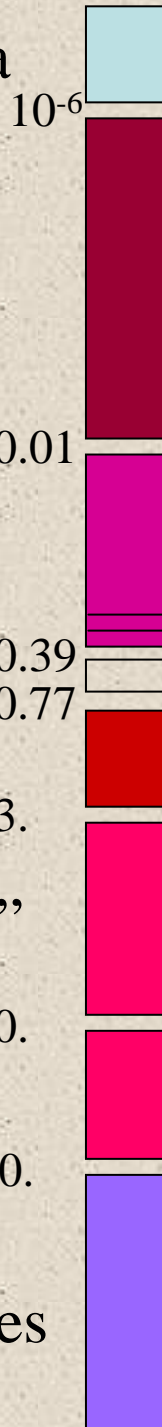
Rayons-X

Ultra  
Violet

Infrarouge "Solaire"

Infrarouge "Thermique"

Micro-ondes



C

B

A

0.39

0.46

0.49

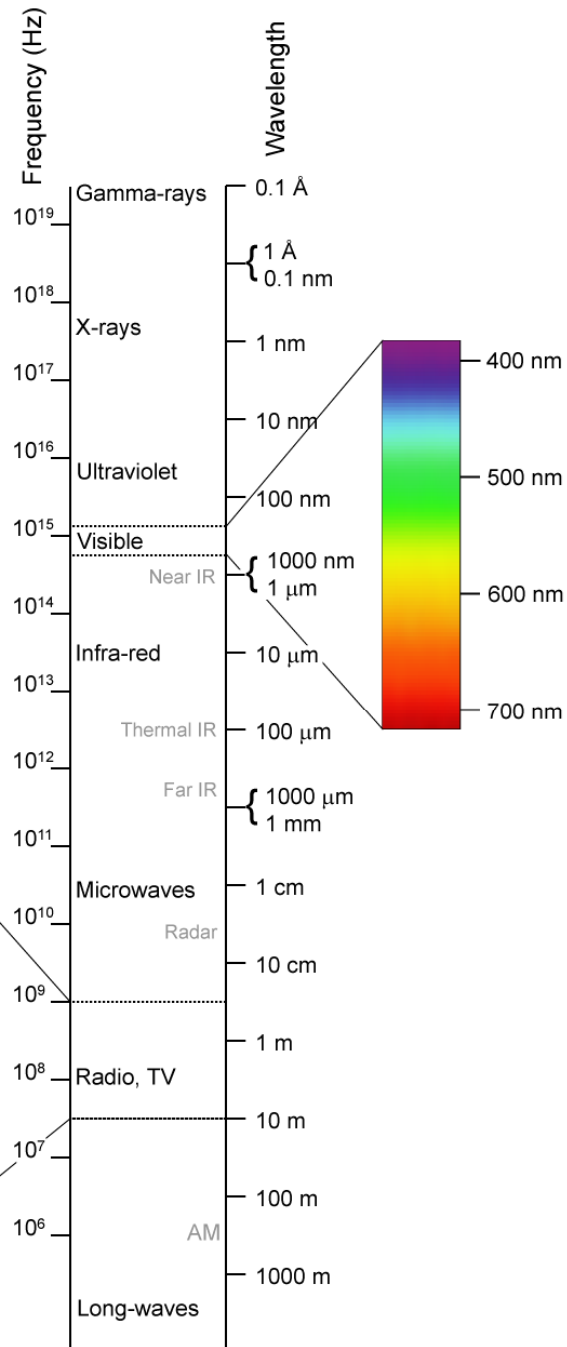
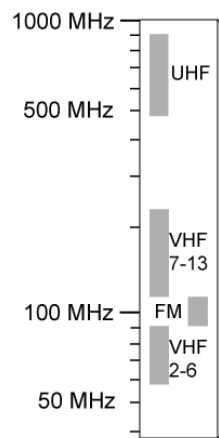
0.56

0.60

0.62

0.77

# Electromagnetic Spectrum



## Ocean Color Radiometry (400-865 nm)

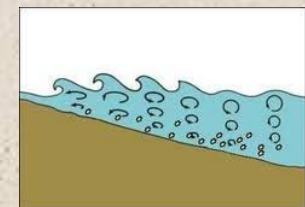
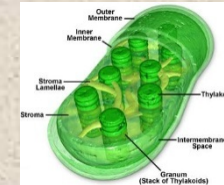
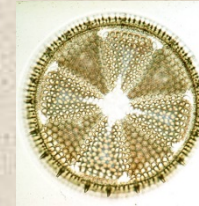
Les mesures "couleur de l'eau" sont basées sur des mesures de l'énergie électromagnétique dans le visible (400 à 700 nm)

± 40 % du spectre solaire



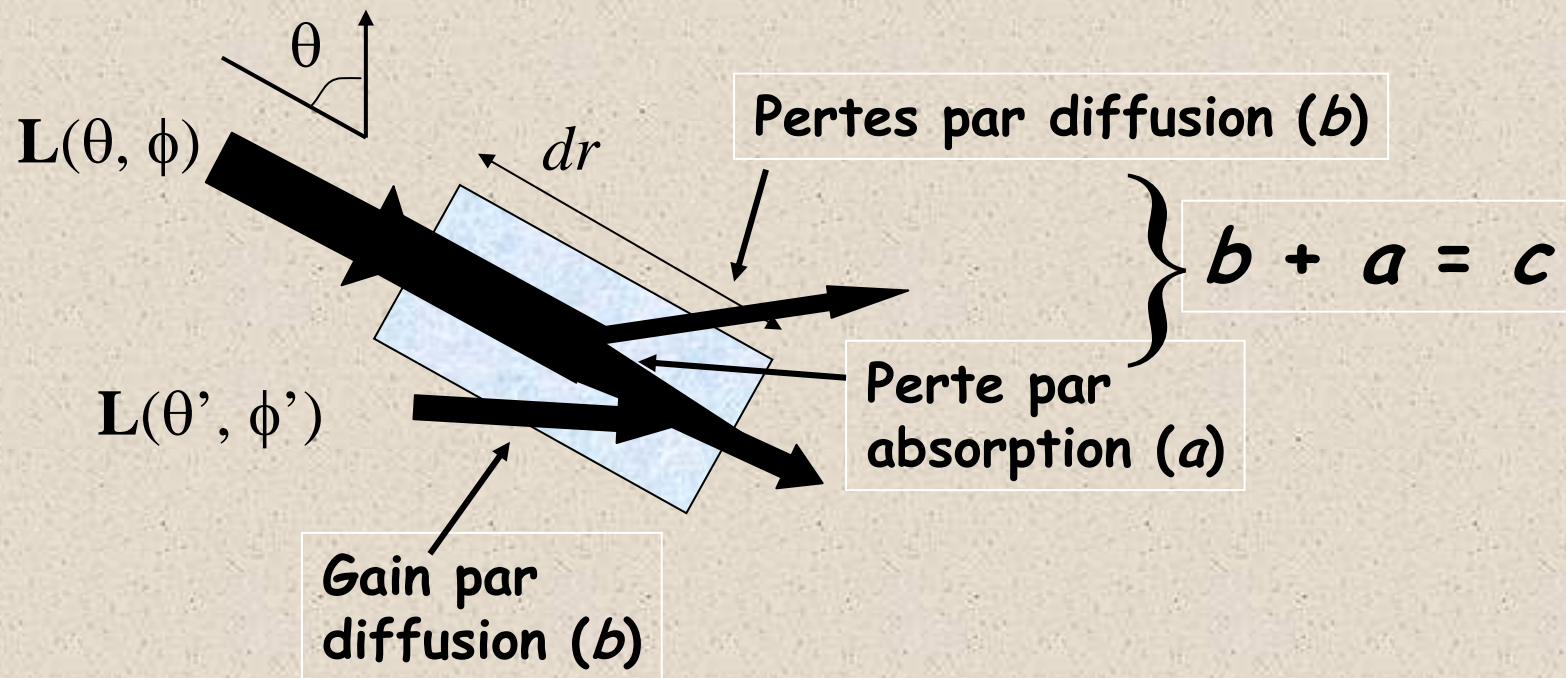
Les facteurs qui influent sur la couleur de l'océan:

- L'eau pure
- Le phytoplancton et ses pigments (chlorophylle)
- La matière organique dissoute
  - "Colored Dissolved Organic Matter" (CDOM, ou substances jaunes ou *gelbstoff*) proviennent de la dégradation de la matière végétale issue des écosystèmes terrestres ou marins.
- Matière particulaire en suspension
  - Les particules organiques incluent du matériel issu de la dégradation du phytoplancton, ou du zooplancton (+ bactéries etc)
  - Les particules inorganiques (sable, poussières) proviennent de l'érosion terrestre et sont amenées vers l'océan via
    - Décharges fluviales.
    - Dépôts via le vent
    - Remise en suspension due à l'hydrodynamisme



## Equation de Transfert Radiatif (RTE)

$$\frac{dL(\theta, \phi)}{dr} = -cL(\theta, \phi) + 2\pi \int_0^{4\pi} \beta(\theta, \phi, \theta', \phi') L d\omega'$$



Les IOPs sont:

L'absorption,  $a$  ( $\text{m}^{-1}$ ), et l'indicatrice de diffusion,  $b$  ( $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$ )

**Coefficient d'absorption** absorbance d'une couche infiniment mince d'un milieu Positionné perpendiculaire au rayon incident, divisé par l'épaisseur de la couche

**Indicatrice de diffusion** (coefficient angulaire de diffusion): Intensité radiative émise par un élément de volume  $dV$  dans une direction donnée, par unité d'éclairement arrivant sur la section efficace et par unité de volume.



- Les IOPs dépendent exclusivement de la composition du milieu (cad ne dépendent pas des conditions d'éclairement).
  - Par exemple les IOPs sont les mêmes pour un soleil à  $0^\circ$  et un soleil à  $60^\circ$  pour un milieu donné.
- Les IOPs sont additives

Le principe d'additivité:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda) + a_{\text{ph}}(\lambda) + a_{\text{NAP}}(\lambda)$$

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_p(\lambda)$$

$$b_{\text{bp}}(\lambda) = b_{\text{bw}}(\lambda) + b_{\text{bp}}(\lambda)$$

## Le spectre d'absorption du phytoplancton résulte:

- De la superposition du spectre d'absorption des différents pigments qui varient essentiellement suivant l'espèce, et la profondeur considérée.
- De la taille, et de la forme
- De l'effet de « package » ou effet de discrétisation (provoqué par les variations de taille et de forme).

### *Quelques pigments:*

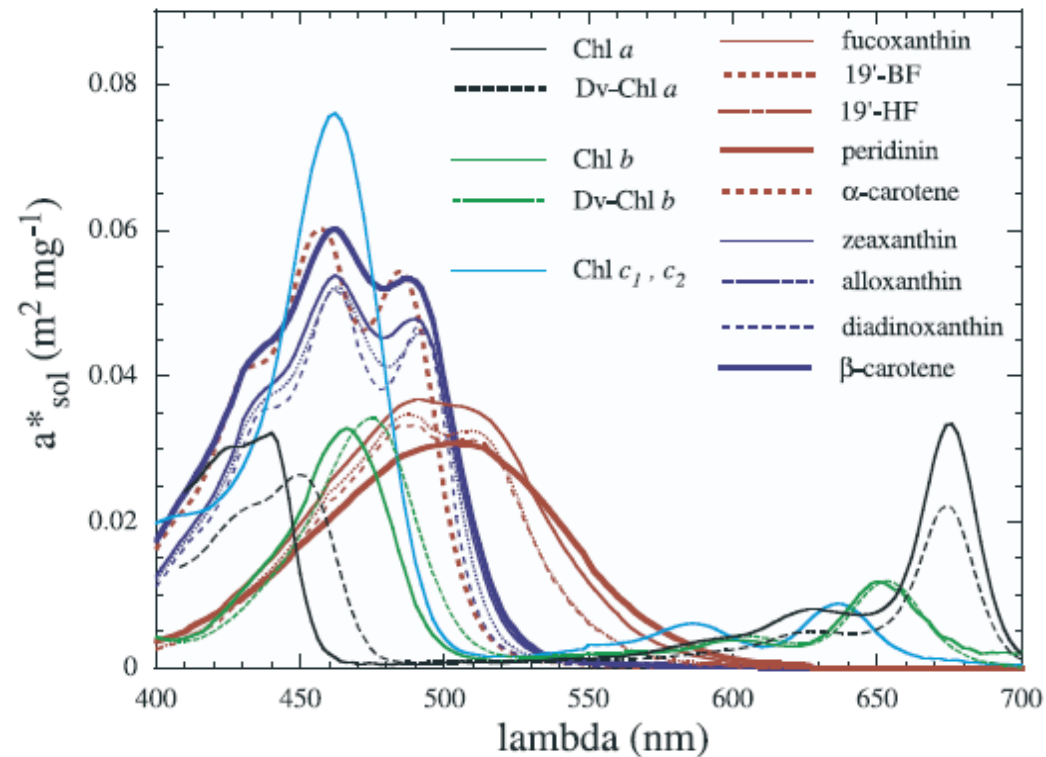
*Chl a (443, et 675); les caroténoïdes (450-500): proportion variable responsable du changement de couleur bleu/vert des eaux oligotrophes aux eaux eutrophes.*

*Chl c: 465 et 635 nm*

*Les phaéopigments (matière phytoplanctonique détritique, morte)*



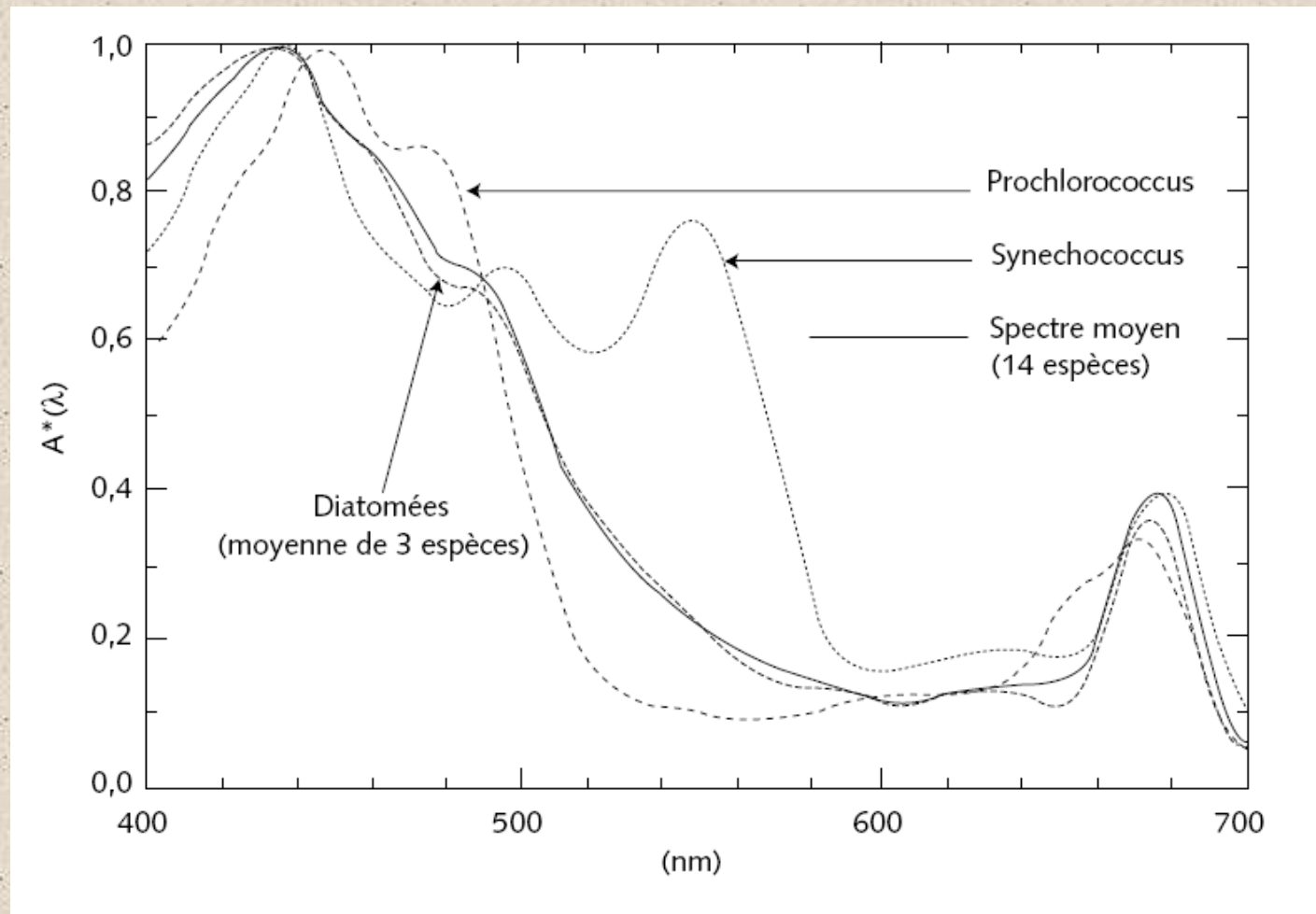
## spectres d'absorption de différents pigments



**Figure 1.** Assumed in vivo weight-specific absorption spectra of the main pigments,  $a_{\text{sol},i}^*(\lambda)$  (in  $\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$ ), as derived from absorption spectra of individual pigments in solvent (see text). Absorption spectra of photosynthetic and nonphotosynthetic carotenoids are shown in red and blue, respectively.

Bricaud et al., 2004

$$a_{\text{ph}}^*(\lambda) = \frac{a_{\text{ph}}(\lambda)}{\text{Chl}}$$



## Absorption de la matière dissoute colorée, $a_{ds}$ (ou $a_{ys}$ , ou $a_{cdom}$ )

Peut être d'origine terrigène ou produite localement par dégradation de la matière détritique par les bactéries, et est aussi sujette à la photo-oxydation

Forte valeurs de  $S'$  : généralement CDOM dominée par l'acide fulvic (origine marine)

Faible valeur de  $S'$  : généralement CDOM dominée par l'acide humic (terrestre)

$$a_{ds}(\lambda) = a_{ds}(\lambda_0) \exp(-S'(\lambda - \lambda_0))$$

En moyenne  $S = 0.014$  (Bricaud et al., 1981)



La dépendance spectrale de  $b_p$  et  $b_{bp}$  se fait généralement de la façon suivante:

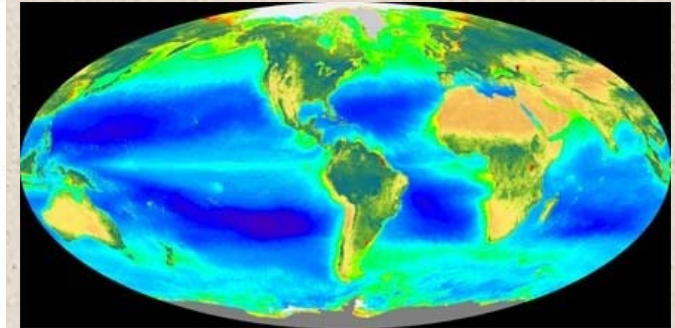
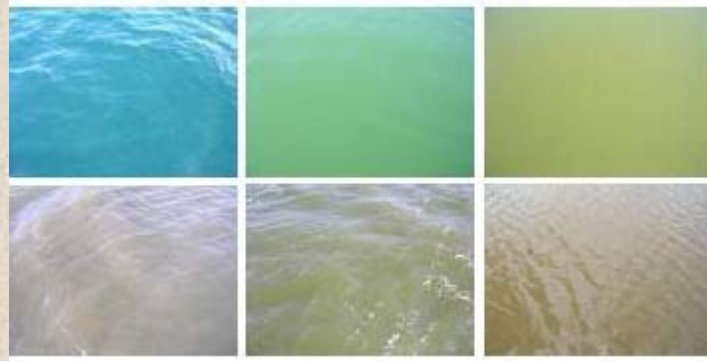
$$b_p(\lambda) = b_p(550) \left( \frac{\lambda}{550} \right)^n$$

$n$  varie entre 0 et -3 dans l'océan, avec une valeur moyenne autour de -1

La dépendance spectrale peut être affectée par l'absorption (« absorption depressing effect »).

En absence d'absorption, ou en dehors des bandes d'absorption,  $n$  est relié directement à la pente de la distribution de taille des particules.

# La télédétection couleur de l'eau



**Objectif:** fournir une estimation quantitative des propriétés bio-optiques marines (propriétés optiques inhérentes, chlorophylle, carbone organique particulaire, substances dissoutes, espèces phytoplanctoniques.....)

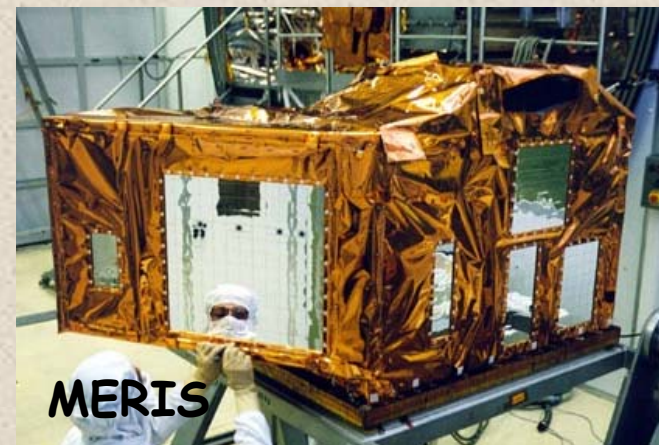
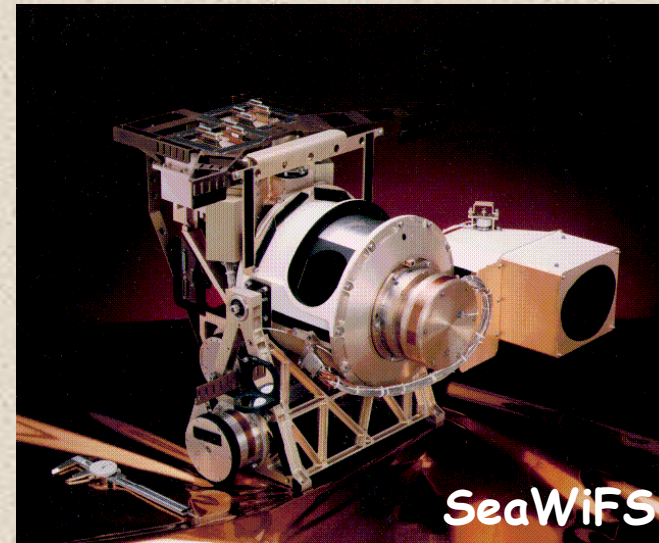
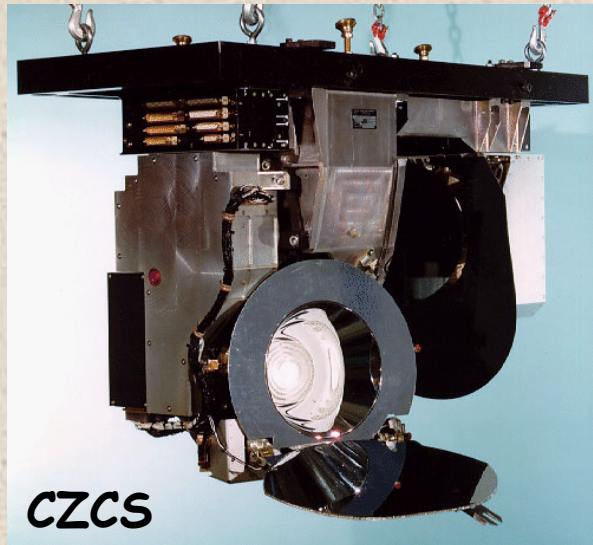
**Comment :** en utilisant les informations fournies par la luminance marine

**Intérêt :**

- Vue synoptique impossible à acquérir in situ
- Forte fréquence d'acquisition et longues couvertures temporelles permettant de suivre la dynamique écosystèmes et les changements à long terme
- Données parfaitement appropriées pour développer et valider des modèles biogéochimiques

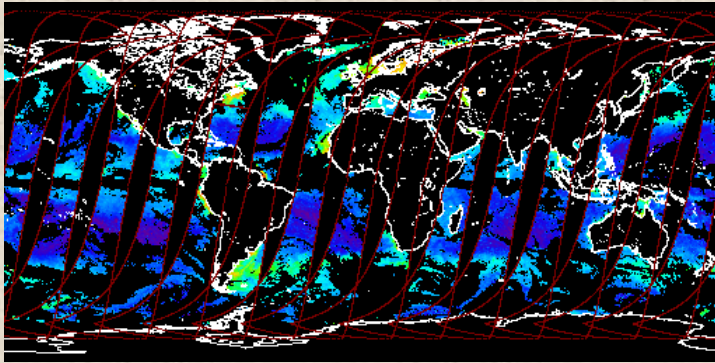
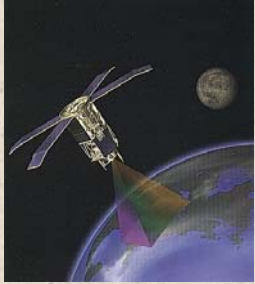


# Les capteurs couleur de l'eau





## Satellites couleur de l'eau



### SeaWiFS (NASA)

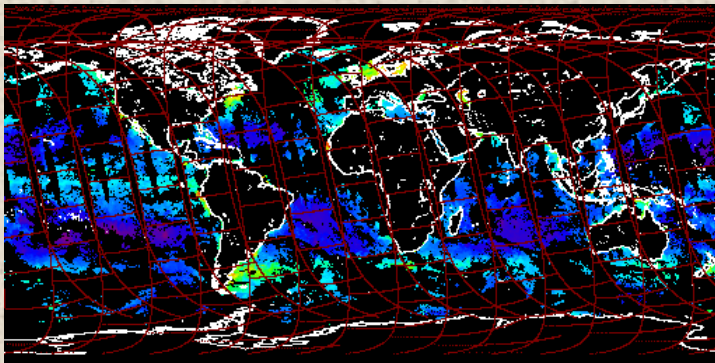
$i = 98^{\circ}20'$

705-km héliosynchrone, orbite descendante

Passage à l'équateur: 12:20

Orbital periode: 99 min.

~14 orbites pour une couverture globale



### MODIS-Aqua (NASA)

$i = 98.2^{\circ}$

705-km héliosynchrone orbite ascendante

Equatorial-crossing time: 13:30

Orbital period: 99 min.

~ 14 orbits pour une couverture globale

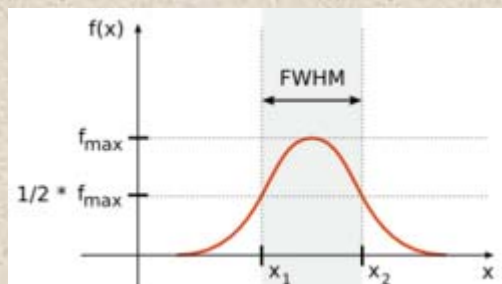
Source: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

# Caractéristiques spectrales

## Caractéristiques générales d'un capteur multispectral

Centres de bandes /  
longueurs d'ondes nominales

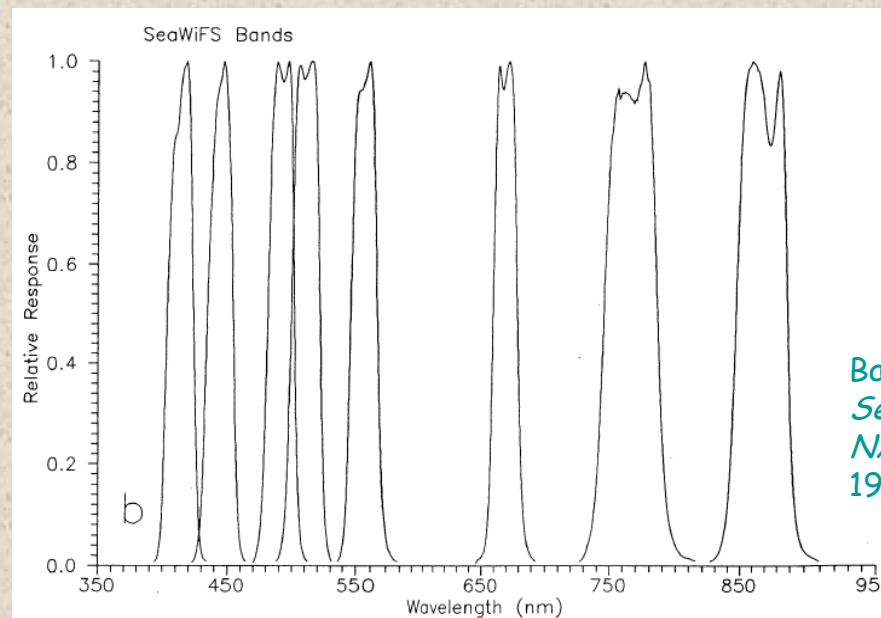
### Spectral half-width



FWHM: Full width at half maximum

Instrument Bands	
Band	Wavelength
1	402-422 nm
2	433-453 nm
3	480-500 nm
4	500-520 nm
5	545-565 nm
6	660-680 nm
7	745-785 nm
8	845-885 nm

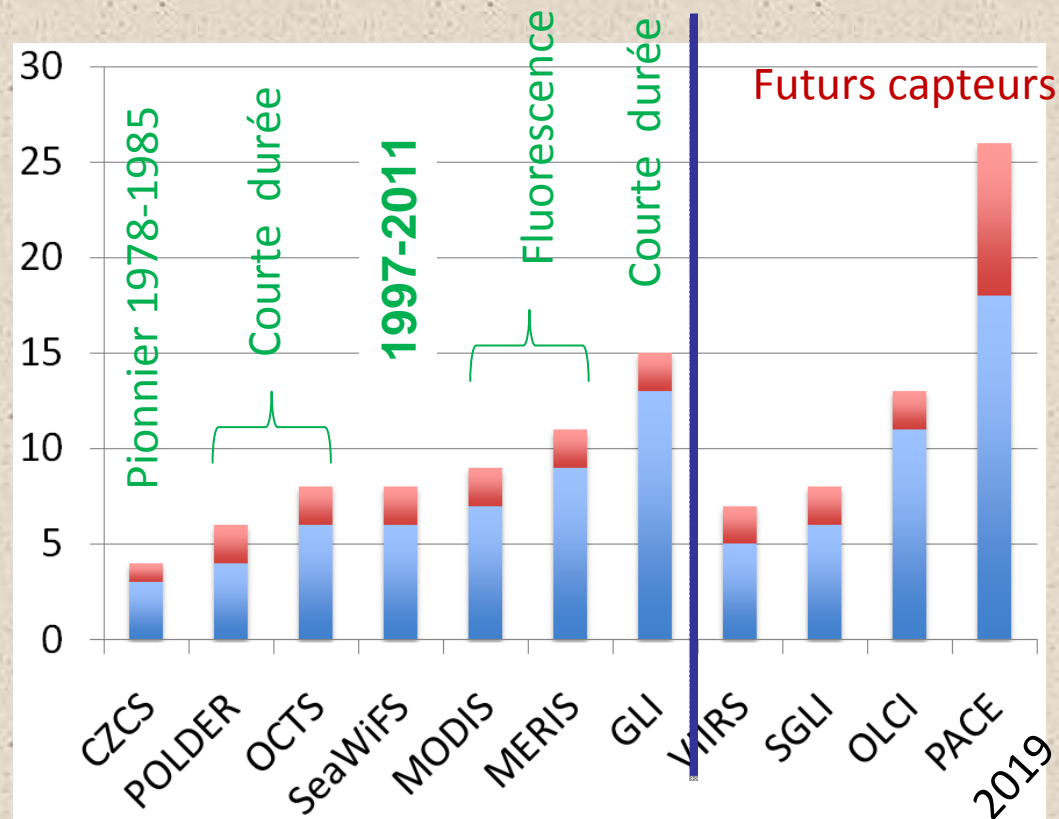
Bandes SeaWiFS





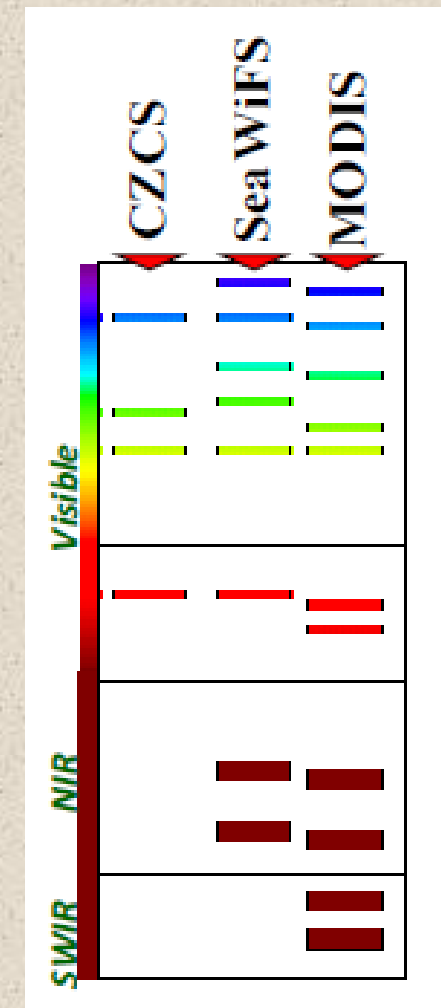
Barnes et al.,  
*SeaWiFS Prelaunch*  
*NASA-TM*, vol. 23,  
1994.

# Evolution des capteurs "couleur de l'eau"

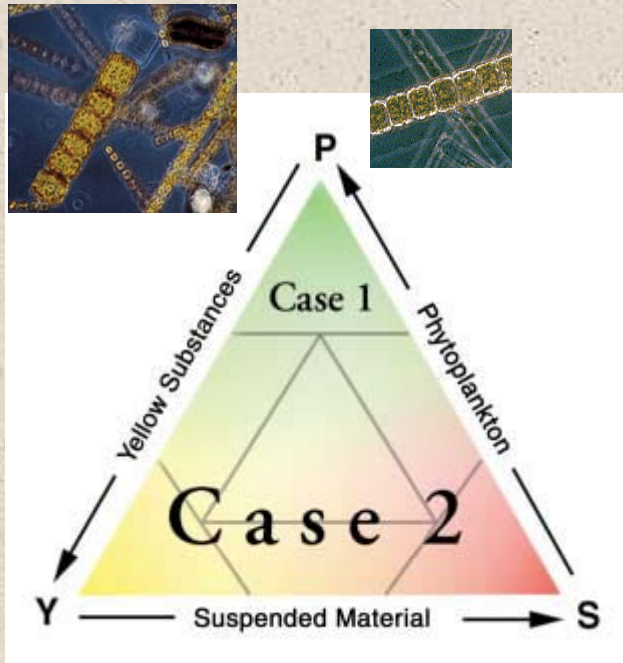
Capteurs couleur de l'eau dans l'ordre chronologique



-  Bandes océaniques
-  Bandes atmosphériques







En prenant en compte les concentrations en matières dissoutes et particulaires présentes dans les eaux marines, Morel and Prieur (1977) ont proposés une classification optique des milieux marins en les subdivisant en **eaux du Cas 1 et du Cas 2**.

Dans les eaux dites du Cas 1, l'influence des pigments phytoplanctoniques prédomine tandis que celle des autres agents optiquement significatifs covarie directement avec la quantité de phytoplancton présent dans l'eau

Dans les eaux du Cas 2, les substances optiquement significatives non-phytoplanctoniques ne co-varient pas avec la Chla (sédiments, matières organiques particulaires et dissoutes) et sont généralement dominants.

→ Complexité des applications couleur de l'eau dans ces milieux optiquement dynamiques et complexes

→ Mais fort intérêt (vulnérabilité, activités économiques, importance dans les cycles biogéochimiques globaux .....)

# La problématique couleur de l'eau

La lumière solaire rétrodiffusée par l'atmosphère (poussières et autres aérosols, diffusion moléculaire -rayleigh) contribue à 80-90% à la luminance mesurée par le satellite dans le visible.



Satellite en orbite à l'altitude  $H$ :

-Sun-synchrone

-Geo-synchrone

Field-of-view

$\Delta\Omega$

Atmosphere

Conditions Limites

Ocean

molecules

aerosols

$\theta_0$

$\theta$

$\phi$

bulles/écume

Nuages

Vent

Profondeur de première pénétration  
=  $Z_{1\%/4.6}$

# Corrections atmosphériques

## L'approche classique :

- l'hypothèse 'black pixel':  $\rho_w=0$  dans le PIR, (à cause de la forte absorption de l'eau pure) (Gordon et al., 1997).
- $\rho_a$  est donc estimée à deux longueurs d'ondes dans le PIR qui permettent de retrouver les types d'aérosols et leurs concentrations en utilisant "des look-up tables" établies à partir de calculs de transfert radiatif.
- Cette information est ensuite extrapolée vers le domaine visible pour retrouver  $\rho_w(\lambda)$

## Principaux problèmes

- Présence d'aérosols absorbants (Antoine et al., 2001)
- Albedo du fond dans les eaux peu profondes
- Présence de sédiments dans les eaux côtières ( $\rho_w \neq 0$  in NIR)
- $\rho_w \neq 0$  dans le PIR pour les eaux eutrophes (Siegel et al., 2001)



# Diversité des Aérosols

## Naturels:

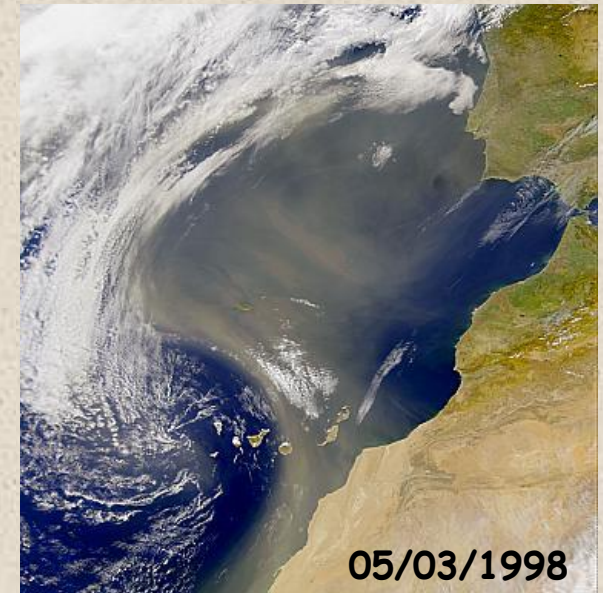
Sels marins

Poussières terrestres

Bioaérosols (bactéries, virus, pollen, champignons, débris cellulaires, biofilms)

Poussières volcaniques

Sulfate des gaz biogéniques / SO<sub>2</sub> volcaniques



## Anthropogéniques:

Particules industrielles

Poussières

Suie

Feux de forêt

Sulfate / Nitrate from SO<sub>2</sub> / NO<sub>x</sub>

Organiques



Dans le cadre des corrections atmosphériques appliquées au visible les aérosols représentent le challenge majeur (au delà de leur intérêt propre)

# Système de "flags"

Flag pour  
SeaWiFS, MODIS

En rouge:  
flags pour les produits de  
niveau Level-3

→ S'assurer de la qualité des  
données radiométriques

→ Éliminer les pixels  
« bruités »

Bit	Name	Description
01	<b>ATMFAIL</b>	Atmospheric correction failure
02	<b>LAND</b>	Pixel is over land
03	BADANC	Reduced quality of ancillary data
04	<b>HIGLINT</b>	High sun glint
05	<b>HILT</b>	Observed radiance very high or saturated
06	<b>HISATZEN</b>	High sensor view zenith angle
07	COASTZ	Pixel is in shallow water
08	NEGLW	Negative water-leaving radiance retrieved
09	<b>STRAYLIGHT</b>	Straylight contamination is likely
10	<b>CLDICE</b>	Probable cloud or ice contamination
11	<b>COCCOLITH</b>	Coccolithofores detected
12	TURBIDW	Turbid water detected
13	<b>HISOLZEN</b>	High solar zenith
14	HITAU	High aerosol optical thickness
15	<b>LOWLW</b>	Very low water-leaving radiance (cloud shadow)
16	<b>CHLFAIL</b>	Derived product algorithm failure
17	<b>NAVWARN</b>	Navigation quality is reduced
18	ABSAER	possible absorbing aerosol (disabled)
19	TRICHO	Possible trichodesmium contamination
20	<b>MAXAERITER</b>	Aerosol iterations exceeded max
21	MODGLINT	Moderate sun glint contamination
22	<b>CHLWARN</b>	Derived product quality is reduced
23	<b>ATMWARN</b>	Atmospheric correction is suspect
24	DARKPIXEL	Rayleigh-subtraced radiances is negative
25	SEAICE	Possible sea ice contamination
26	<b>NAVFAIL</b>	Bad navigation
27	<b>FILTER</b>	Pixel rejected by user-defined filter
28	SSTWARN	SST quality is reduced
29	SSTFAIL	SST quality is bad
30	HIPOL	High degree of polarization
31	spare	spare
32	OCEAN	not cloud or land

# Qualité des données radiométriques

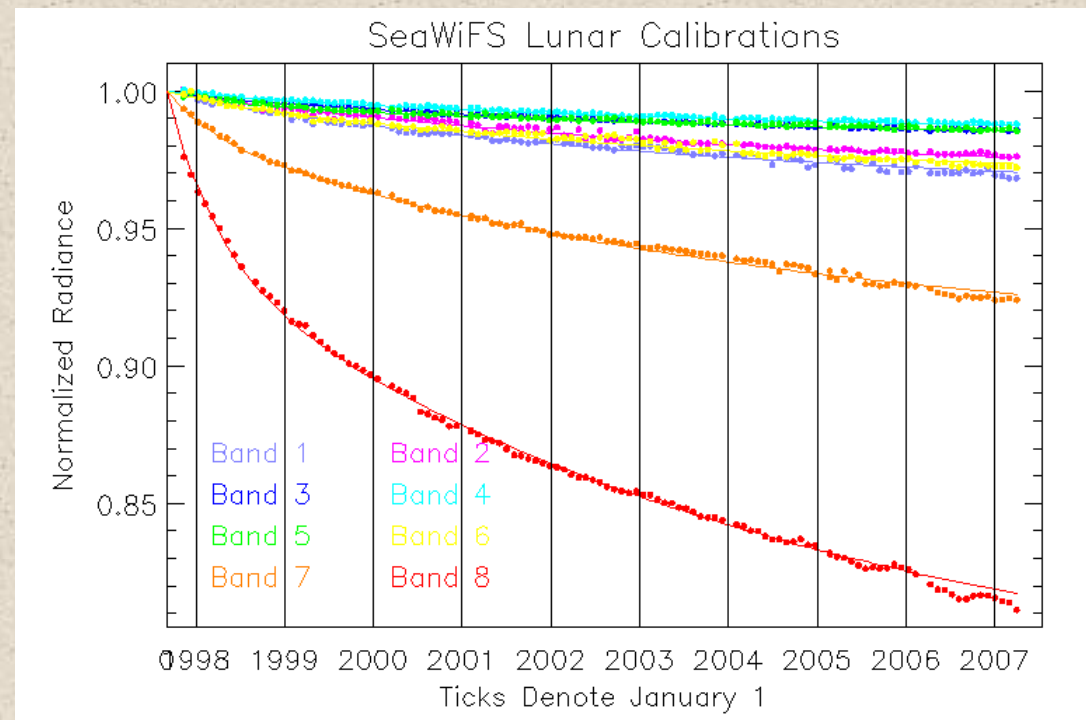
## Calibration embarquée

SeaWiFS:

- Mesures solaires au dessus du Pôle Sud (solar diffuser)
- Mesures lunaires mensuelles



SeaWiFS image de la lune



Suivi de l'évolution temporelle de la sensibilité des différentes bandes