

Chapitre VIII - Télédétection

Instruments de la télédétection marine

Ex **Nom du satellite porteur** (nom du capteur; pas toujours mentionné)

1) radars MW et HF/VHF

- diffusiomètre → SSW
ex **Seasat, ERS-1 (2), ADEOS (2), Quikscat**
- SAR → vagues, structures dynamiques, SSW, nappes
ex **Seasat (SAR), Cosmos, ERS-1 (2), Radarsat, Envisat (ASAR)**
- Altimètre → topographie dynamique, SSW, SSH
ex **GEOS-3, Seasat, Geosat, ERS-1 (2), Topex-Poseidon, Jason-1 (2), Envisat**

Pas sur satellite :

- radar sol HF/VHF → courants, spectres des vagues
- ex **Cosmer (LSEET)** < 35 km

2) radiomètres V/NIR - haute résolution

- turbidité, fronts, nappes, structures bathymétriques, structures thermiques (Landsat seulement)
- ex **Landsat, Spot (HRV, HRVIR), Adeos (Avnir), MOS, Resurs**

3) spectroradiomètres V - moyenne/basse résolution

- couleur de l'eau : chlorophylle, turbidité (+SST pour MODIS)
- ex **Nimbus (CZCS), IRSP-3 (4), Adeos (2) (OCTS, POLDER), Seastar (SeaWiFS), Terra-EOS (MODIS), Envisat (MERIS), ADEOS II (GLI)**

4) radiomètres IR/MW - basse résolution

- SST
- ex **NOAA (AVHRR), MOS, ERS**

5) radiomètres MW

- SST, SSW
- ex **Seasat (SMMR), Nimbus (SMMR), DMSP, Mir**

6) autres

- radar tournant (MIROS, VAGSAT) → vagues
- INSAR → courants, vagues
- lidar → bathy + DOM, Chl
- salinomètre (OSIRIS NASA, MIRAS CNES) → SSS
- radiometre MW + interferomètre (SMOS 2007) → SSS
- GPS bi-statique → SSW, SSS, vagues

Acronymes :

AVHRR = Advanced Very High Resolution Radiometer

ASAR = active SAR

CZCS = Coastal Zone Color Scanner

HRV = Haute Resolution Visible

IR = *infra-rouge* (1.3 μm - 1mm)

MERIS = MEdium Resolution Imaging Spectrometer (300 m)

MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (250m, 500 m, 1km)

MW = *micro-ondes* (1 mm - 1m)

NIR = *proche infra-rouge* (.7-1.3 μm)

OCTS = Ocean Color and Temperature Scanner

POLDER = POLarization and Directionality of the Earth's Reflectance

SeaWiFS = Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (1.1 km; 4 km)

SAR = Synthetic Aperture Radar

SMMR = Scanning Multichannel Microwave Radiometer

SSH = *sea surface height*

SSS = *sea surface salinity*

SSW = *sea surface wind*

V = *Visible* (.4-.7 μm)

SATELLITES FOR OCEANOGRAPHIC STUDIES

Seasat June 27, 1978 99 jours power system failure; 800 km orbite proche polaire; couvrant 95 % terre; SAR 25 m résolution

SPOT

SPOT 4, launch, March, 1998

10 mètres en mode panchromatique ; ne distingue pas les couleurs (image en Noir et Blanc)

20 mètres en mode multispectral (couleurs)

SPOT 5; lancé le 4 Mai 2002, fusée Ariane 4; évolue à 830 km d'altitude

Résolution 2,5 m au lieu de 10 m; tour de Terre en 101 mn; mode HRS Haute Resolution

Stereoscopique: reconstitution 3D du relief terrestre "modèles numériques de terrain"

Futur: Pléiades (avec Italie) – observation optique de la Terre

Nimbus 7 Oct 78 -> mi-1986

CZCS: 420, 520, 550, 670 (20 nm) Ocean color
700 - 800 nm Surface vegetation
10 500 - 12 500 nm Surface T

Satellite	Capteur	Orbite	Depuis
NOAA (16)	AVHRR	polar	Nov 81
SeaStar	SeaWiFS	polar 705 km	Sept 97
Meteosat	Seviri	geostat	
EOS	MODIS	polar 705 km	dec 99 ?; 250, 500, 1 km 36 bandes UV, V, IR
ERS-1, ERS-2 (ESA)	SAR		
ENVISAT	MERIS		mars 2002 ? 300 m; 15 bandes V, NIR
ADEOS	OCTS, POLDER		

ADEOS (Japanese satellite) until June 97

Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) 12 bands visible + IR

Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance (POLDER) CNES

angular characteristics of the earth's reflectance (14 directions)

scanned four times every 5 days

NASA Scatterometer (NSCAT)

active microwave radar to measure wind speed and direction over the oceans

by

transmitting Ku band microwave pulse (13.995 GHz)

greenhouse gases etc

ADEOS II launched in 2000

Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance (POLDER) CNES

SeaWinds ex NASA Scatterometer (NSCAT)

SeaStar satellite

SeaWiFS: Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor

low Earth, circular, parking orbit of 278 km with an inclination of 98 degree 20 minute ; solar panels with batteries

Band	Center Wavelength (nm)	Bandwidth
1	412	20
2	443	20
3	490	20
4	510	20
5	555	20
6	670	20
7	765	40
8	865	40

LAC data (1.1 km au nadir) ; GAC (4.4 km au nadir)

OCM Ocean Color Monitor (India) satellite: IRS – P4 (depuis 99 ?)

MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS)

36 longueurs d'onde

satellites: EOS-AM, EOS- PM

NASA Earth Observing System (EOS)

Primary Use	Band	Bandwidth (nm)	Colour	CZCS	AVHRR	SeaWiFS	
Land / Cloud Boundaries	1	620 - 670	red		1		1
Land / Cloud Properties	2	841 - 876			2		2
	3	459 - 479	aqua	1			
	4	545 - 565	green				
	5	1230 - 1250					
	6	1628 - 1652					
	7	2105 - 2155					
Ocean Color / Phytoplankton / Biogeochemistry	8	405 - 420	violet			1	
	9	438 - 448	aqua			2	7
	10	483 - 493	blue			3	
	11	526 - 536	green	2			8
	12	546 - 556	green	3		5	9
	13 *	662 - 672	red				
	14 *	673 - 683	red	4	1	6	
	15	743 - 753	red	5		7	
	16	862 - 877				8	
	17	890 - 920			2		
Atmospheric Water Vapor	18	931 - 941					1
	19	915 - 965					
Primary Use	Band	Bandwidth (µm)		CZCS	AVHRR	SeaWiFS	
Surface / Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840			3		3
	21	3.929 - 3.989					
	22	3.929 - 3.989					
	23	4.020 - 4.080					
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498					
	25	4.482 - 4.549					
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390					
	27	6.535 - 6.895					
	28	7.175 - 7.475					
	29	8.400 - 8.700					
Ozone	30	9.580 - 9.880					
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280			4		4
	32	11.770 - 12.270			5		5
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485					
	34	13.485 - 13.785					
	35	13.785 - 14.085					
	36	14.085 - 14.385					

Extrait de <http://www.sat.dundee.ac.uk/modis.html>

ENVISAT May 2000 5ans ESA polar
MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) 1150 km
Spectral range: 390 nm to 1040 nm (soleil pas de nuages)
Spectral resolution: 2.5 nm
Band transmission capability:
Up to 15 spectral bands, programmable in position and width
ASAR (5.3 GHz ; C band) active SAR reflectivity (nuages ou non)
DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)
ozone monitoring, stratosphere chemistry

<http://envisat.estec.esa.nl/>

NOAA AVHRR – voir fin du cours et TD
depuis 1981

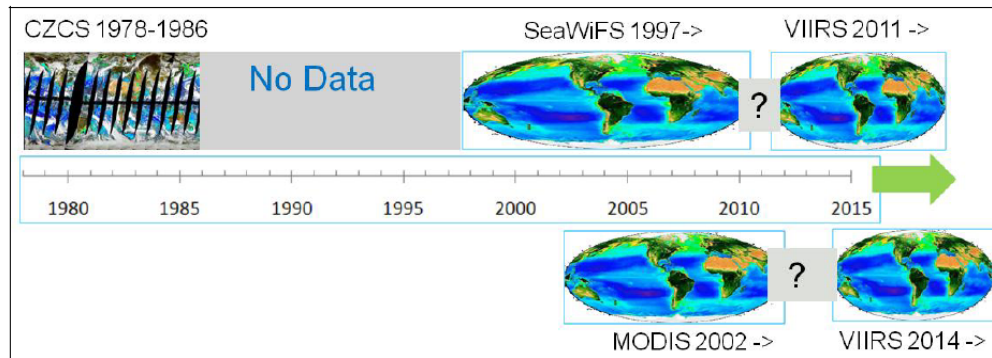
Satellites	altitude	signal delay	coverage	
LEO	< 2,000 km	1/100 S	20X	LEO = Low Earth Orbit
MEO	10,000 km		4X	MEO = Medium Earth Orbit
GEO	36,000 km	¼ S	X	GEO = Geostationary Earth Orbit

GEO – voice ok pour TV & data

Plateforme (ballon dirigeable/avion)
HALE High Altitude Long Endurance 20 km

Hammann et Puschell, SeaWiFS-2: an ocean color data continuity mission to address climate change, Remote Sensing System Engineering II, edited by Philip E. Ardanuy, Jeffery J. Puschell, Proc. of SPIE Vol. 7458, 745804 · © 2009 SPIE

Figure 1 shows the sequence of NASA present and upcoming missions; there have been a number of international missions that have also contributed sporadically. While SeaWiFS and MODIS (Aqua) age, efforts are underway to launch the VIIRS sensor on NPP and NPOESS missions.



SENSOR	AGENCY	SATELLITE	LAUNCH DATE	SWATH (km)	RESOLUTION (m)	BANDS	SPECTRAL COVERAGE (nm)	ORBIT
COCTS*	CNSA (China)	HY-1B (Korea)	11 Apr. 2007	1400	1100	10	402 - 12,500	Polar
CZI*	CNSA (China)	HY-1B (Korea)	11 Apr. 2007	500	250	4	433 - 695	Polar
MERIS	ESA (Europe)	ENVISAT (Europe)	1 Mar. 2002	1150	300/1200	15	412-1050	Polar
MMRS*	CONAE (Argentina)	SAC-C (Argentina)	21 Nov. 2000	360	175	5	480-1700	Polar
MODIS-Aqua	NASA (USA)	Aqua (EOS-PM1)	4 May 2002	2330	1000	36	405-14,385	Polar
MODIS-Terra	NASA (USA)	Terra (EOS-AM1)	18 Dec. 1999	2330	1000	36	405-14,385	Polar
OCM	ISRO (India)	IRS-P4 (India)	26 May 1999	1420	350	8	402-885	Polar
OSMI*	KARI (Korea)	KOMPSAT (Korea)	20 Dec. 1999	800	850	6	400-900	Polar
POLDER-3	CNES (France)	Parasol Myriade Series	18 Dec. 2004	2100	6000	9	443-1020	Polar
SeaWiFS	GeoEye (USA)	OrbView-2 (USA)	1 Aug. 1997	2806	1130	8	402-885	Polar

Table 2. Current ocean color sensors.

SENSOR	AGENCY	SATELLITE	SCHEDULED LAUNCH	SWATH (km)	RESOLUTION (m)	# OF BANDS	SPECTRAL COVERAGE (nm)	ORBIT
OCM-2	ISRO (India)	Oceansat-2 (India)	Aug. 2009	1420	360 m	8	400 - 900	Polar
HSI	DLR (Germany)	EnMAP	2012	30	30	~200	420 - 2450	Polar
GOCI	KARI/KORDI	COMS-1 (Korea)	2010	2500	500	8	400 - 865	Geostationary
COCTS*	CNSA (China)	HY-1C/D (Korea)	2010	1400	1100	10	402 - 12,500	Polar
CZI*	CNSA (China)	HY-1C/D (Korea)	2010	500	240	4	433 - 695	Polar
OLCI*	ESA (Europe)	GMES-Sentinel 3A/B (ESA)	2012 2015	1120	260	21	400 - 900	Polar
S-GLI*	JAXA (Japan)	GCOM-C (Japan)	2012	1150	250/1000	19	375 - 12,500	Polar
VIIRS	NPOESS IPO	NPP	2011	3000	370 / 740	22	402 - 11,800	Polar
VIIRS	NPOESS IPO	NPOESS	2014	3000	370 / 740	22	402 - 11,800	Polar

Table 3. Planned ocean color sensors.

Main hyperspectral sensors on aircraft and satellites

Table 1

Hyperspectral sensors on satellites			
Types of sensors	Producer	Number of bands	Spectral range [μm]
FTHSI on MightySat II	Air Force Research	256	0.35-1.05
Hyperion on EO-1	NASA Guddard Space Flight Center	242	0.40-2.50
Hyperspectral sensors on aircrafts			
AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab.	224	0.40-2.50
HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)	Naval Research Lab.	210	0.40-2.50
PROBE-1	Earth Search Sciences Inc.	128	0.40-2.50
CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)	ITRES Research Limited	Over 228	0.40-1.00
HyMap	Integrated Spectronics	100 la 200	Visible to termal infrared
EPS-H (Environmental Protection System)	GER Corporation	VIS/NIR (76), SWIR1 (32), SWIR2 (32), TIR (12)	VIS/NIR (0.43-1.05) SWIR1 (1.50-1.80) SWIR2 (2.00-2.50) TIR (8-12.50)
DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation (Geophysical and Environmental Research Imaging Spectrometer)	VIS/NIR (32), SWIR1 (8), SWIR2 (32), MIR (1), TIR (12)	VIS/NIR (0.43-1.05) SWIR1 (1.50-1.80) SWIR2 (2.00-2.50) MIR (3.00-5.00) TIR (8.70-12.30)
DAIS 21115 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	GER Corporation	VIS/NIR (76), SWIR1 (64), SWIR2 (64), MIR (1), TIR (6)	VIS/NIR (0.40-1.00) SWIR1 (1.00-1.80) SWIR2 (2.00-2.50) MIR (3.00-5.00) TIR (8.00-12.00)
AISA (Airborne Imaging Spectrometer)	Spectral Imaging	Over 288	0.43-1.00

Vorovencii, Bulletin of the *Transilvania University of Braşov* • Vol. 2 (51) - 2009 • Series II

Hyperspectral sensors are characterized by the fact that they produce records in a large number of adjacent and narrow lanes thereby providing a very high spectral resolution. In this way, interpretations and analyses can be made of the remote images at the micro-level, highlighting the features of details which could not be underlined with multispectral sensors

ACCES AUX DONNEES /ADRESSES INTERNET

GRATUIT:

SST NOAA/AVHRR

<http://poet.jpl.nasa.gov/>

<http://www.cdc.noaa.gov/map/>

http://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/archive/archive_chart_sst50km_2006.html

(twice weekly composite)

Couleur/SeaWiFS/MODIS

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

Altimétrie/Courants - TOPEX, JASON

http://www-ccar.colorado.edu/~realtime/global_realtime/geovel.html

Carte des courants géostrophiques déduits de l'altimétrie (latitude variant de 66 S à 37 N; n'inclut pas le Golfe du Lion ; valeurs par défaut donnent le Golfe du Mexique)

<http://www.jason.oceanobs.com/> en français

<http://www.aviso.oceanobs.com/fr/kiosque/les-plus-belles-images-de-l-altimetrie-autour-du-monde/index.html>

Les plus belles images des applications de l'altimétrie sous Google Earth : courants, tourbillons, géoïde, [bathymétrie](#), ..

PAYANT ou INSCRIPTION

Visible - SPOT

SPOT IMAGE (F) : <http://www.spot.com/> depuis 1986

Résolution 2,5 m au lieu de 10 m; mode HRS Haute Resolution Stereoscopique: reconstitution 3D du relief terrestre "modèles numériques de terrain"

SAR - ERS1-ERS2

ESA : <http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=4001>

et LANDSAT

EURIMAGE : <http://www.eurimage.com/>

Landsat 7 data is not available for acquisitions after 31 May 2003, due to mechanical problems with the ETM+ sensor

et Vent et altimétrie

CERSAT (F) : <http://www.ifremer.fr/cersat/>

EUMETSAT : <http://www.eumetsat.de/en/>

joint European/US polar satellite system. EUMETSAT plans to assume responsibility for the "morning" (local time) orbit and the US will continue with the "afternoon" coverage. It is planned to carry EUMETSAT instruments on the METOP satellite, developed in cooperation with ESA, for a launch in the year 2005.

BOUEES ARGOS

<http://www.elsamerica.com/argos-system.html>

ex. Satellite Receiving stations:

ACRI (Sophia-Antipolis, France): <http://www.acri.fr/French/esa.html>

MERIS

Dundee (UK) : <http://www.sat.dundee.ac.uk/>

AVHRR, SeaWiFS, Sevir, MODIS

Or other site: <http://www.neodaas.ac.uk/>

(NEODAAS = Natural Environment Observation Data Acquisition and Analysis Service)

DLR/ISIS (D): <http://isis.dlr.de/>

Applications

<http://envisat.esa.int/live/>

Assimilated OzoneField (North Pole)

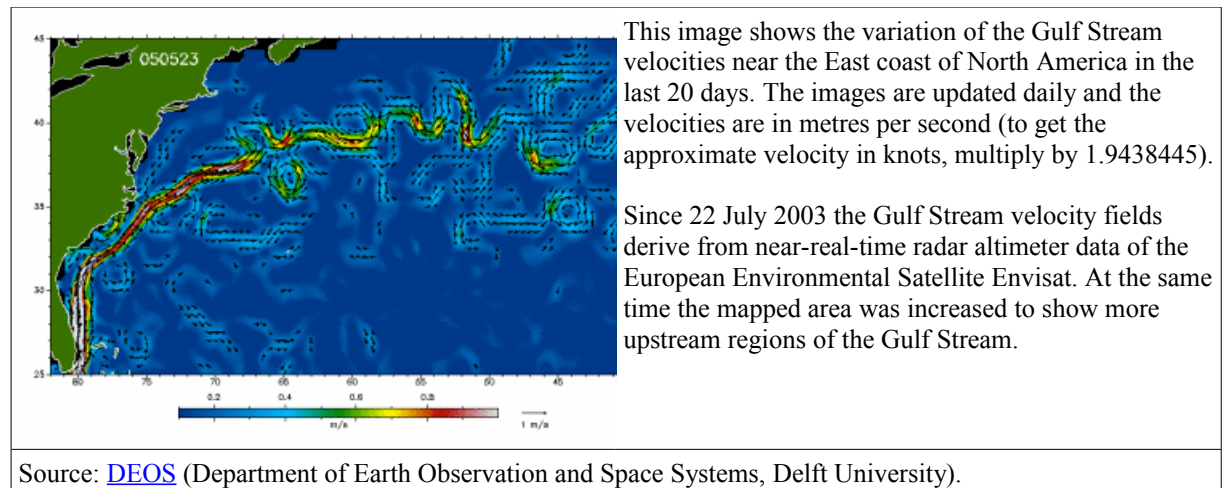
Cloud structures with MERIS data

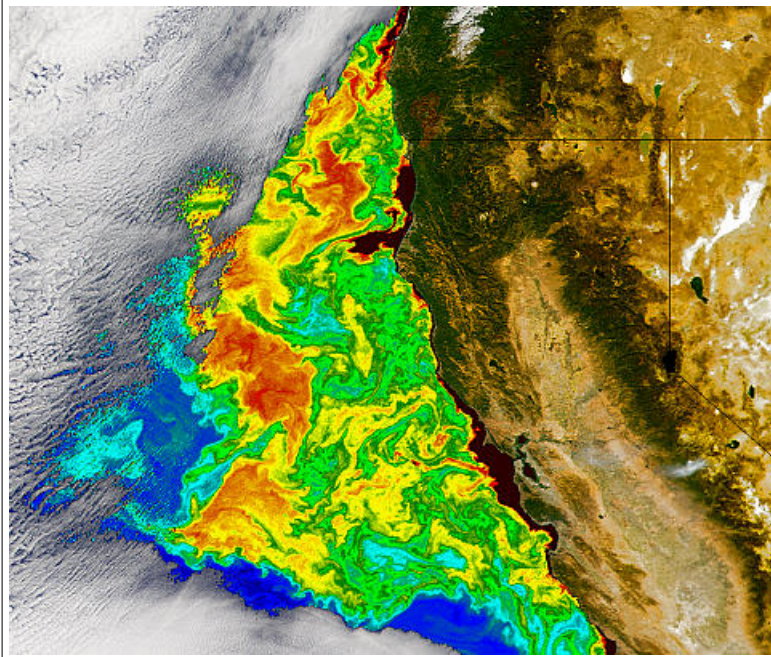
Near-real-time Sea Level Anomalies

Mercator Ocean maps: Global Ocean Surface Temperature

MERIS Level 1 "Image of the Day"

MERIS Global Coverage Quicklooks





http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/image_archive.cgi?c=COASTAL

Winds blowing southward along the west coast of the United States -- because of [friction and the effects of Earth's rotation](#) -- cause the surface layer of the ocean to move away from the coast. As the surface water moves offshore, cold, nutrient-rich water upwells from below to replace it. This [upwelling](#) fuels the growth of marine phytoplankton which, along with larger seaweeds, in turn nourish the incredible diversity of creatures found along the northern and central California coast.

Sensors such as SeaWiFS can ["see"](#) the effects of this upwelling-related productivity because the chlorophyll-bearing phytoplankton reflect predominantly green light back into space as opposed to the water itself which reflects predominantly blue wavelengths back to space.

The ocean areas of the [above image](#) (collected on 6 October 2002) are color coded to show chlorophyll concentrations. Land and cloud portions of the image are presented in quasi-natural color.

A l'heure actuelle il n'y a que deux capteurs capables de détecter les UV :

- 1) DAIS (IRD) qui est actuellement équipé sur un avion.
- 2) FTHSI sur le satellite MightySat 2 qui appartient à l'US Air Force.

Il y a actuellement des propositions qui sont faites pour lancer un SeaWifs-2 qui serait capable de détecter les UV, et afin de réduire le budget pour sa mise en orbite il serait utilisé un petit lanceur tel que le Pegasus.

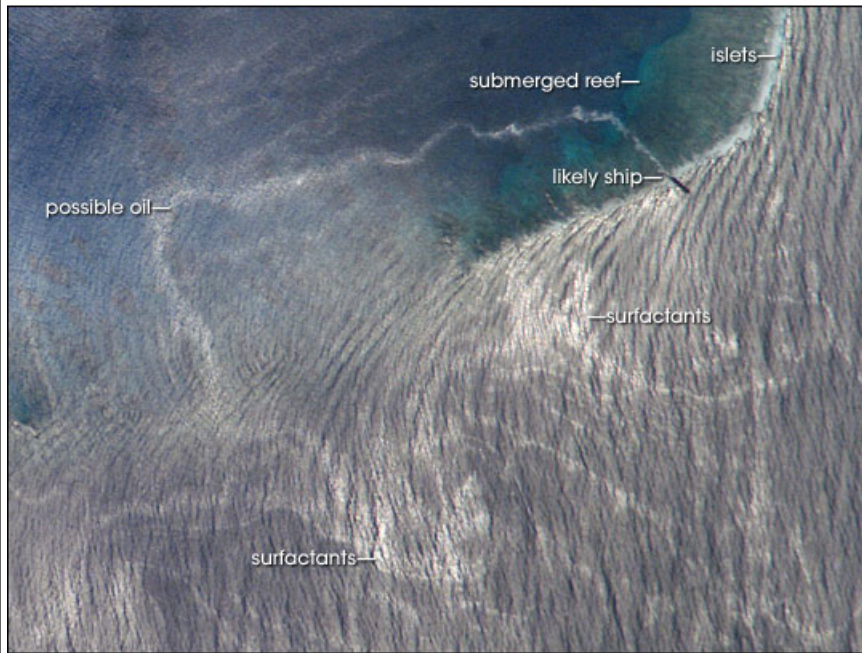
Remarque : SeaWifs continue de fonctionner alors que sa durée de vie théorique est terminée. (extrait présentation J. Derot, 2010-2011)

+ Photos de l'International Space Station (ISS), en l'air depuis 20 nov 98

http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=17413



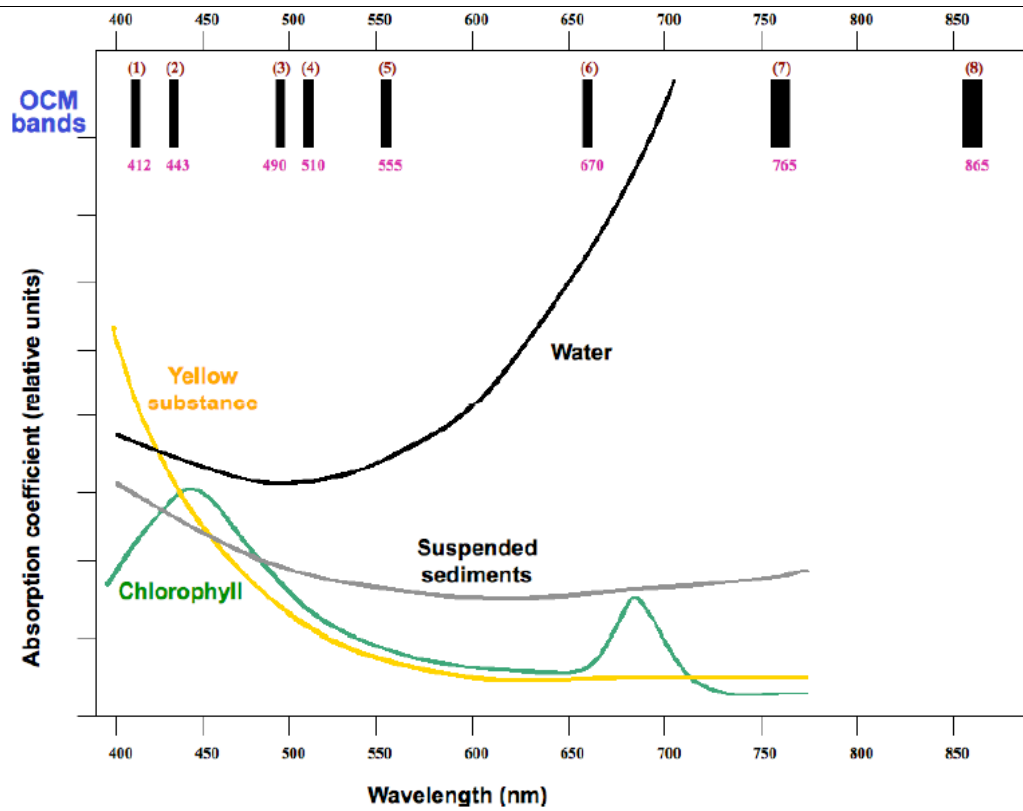
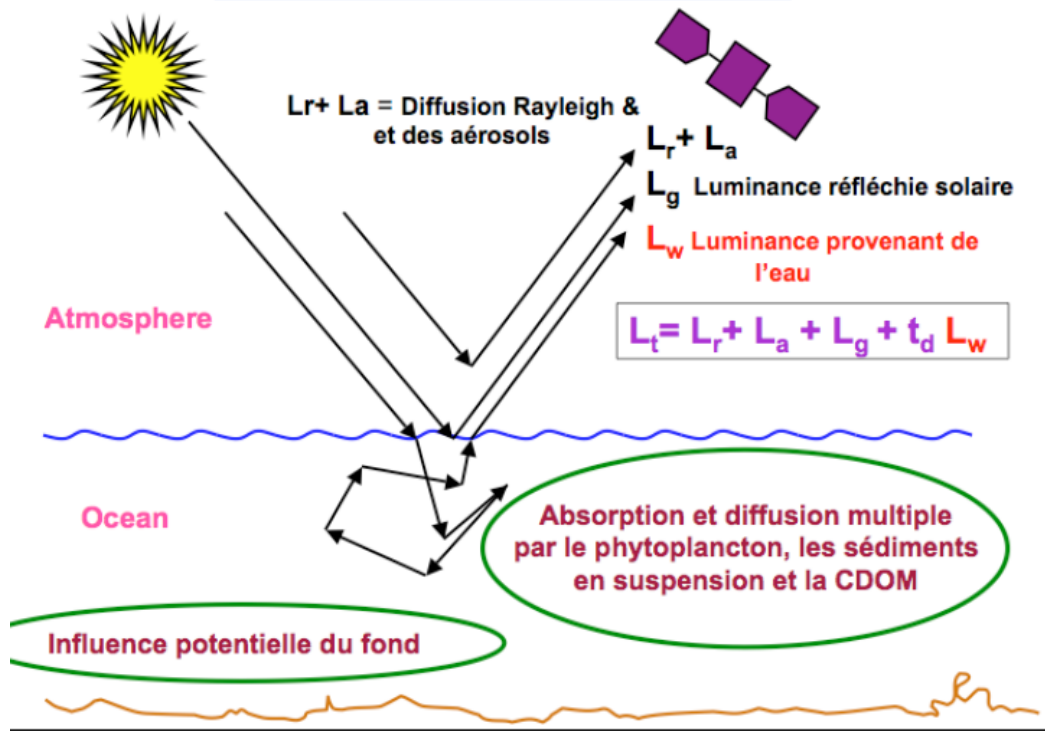
ISS013-E-71473



ISS013-E-71468

Wave Patterns Near Bajo Nuevo Reef, Caribbean Sea

Télédétection dans le visible



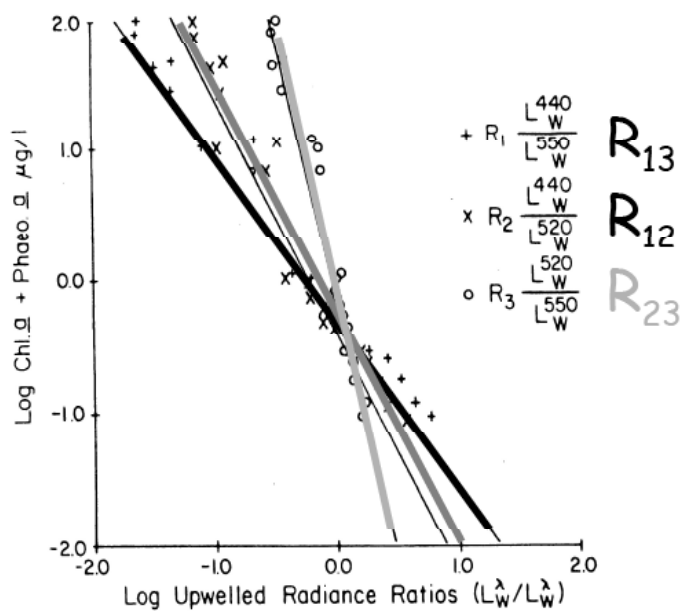
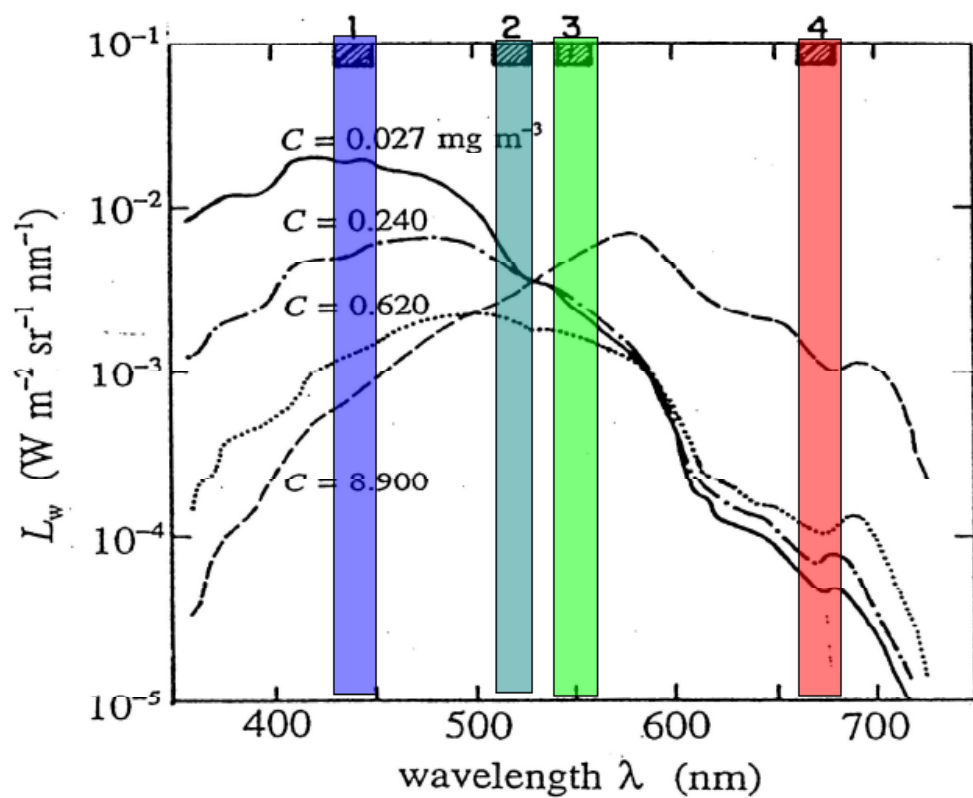


Figure 7.12 Ratios R of upwelling radiance just above the sea surface between pairs of light bands, as a function of the chlorophyll and phaeopigment concentration at the surface. The superscript on L refers to the wavelength in nanometers (from Gordon and Clark, 1980).

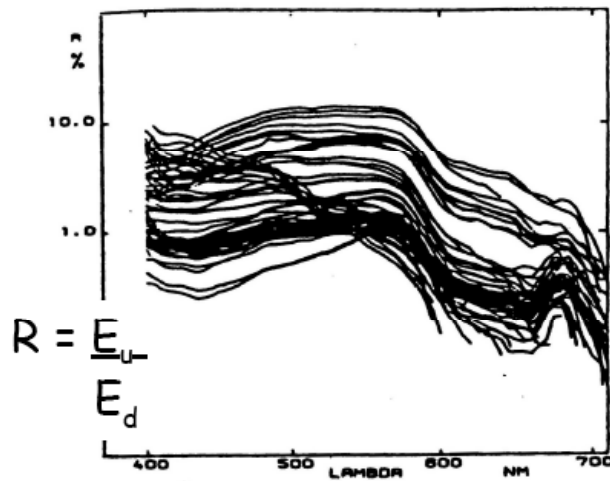
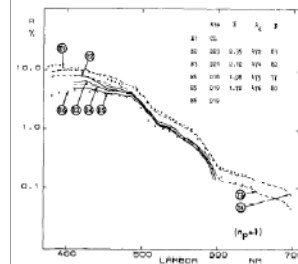
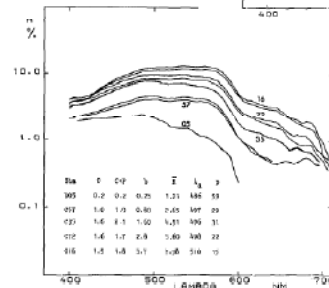
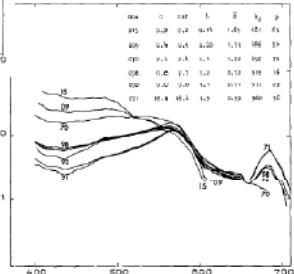


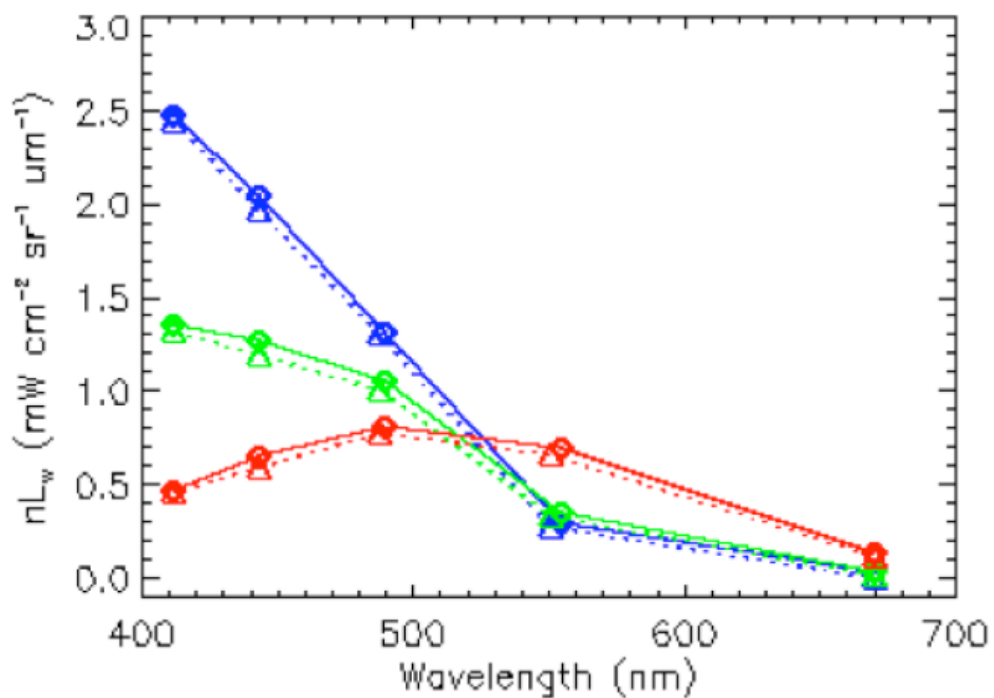
Fig. 1. Reflectance ratio $R(\lambda)$, expressed in percent, plotted with logarithmic scale vs. wavelength λ in nm, for 81 experiments in various waters. Same units and scales also used in Figs. 4, 5, 6, 7, and 11.



"v-type"
phytoplankton

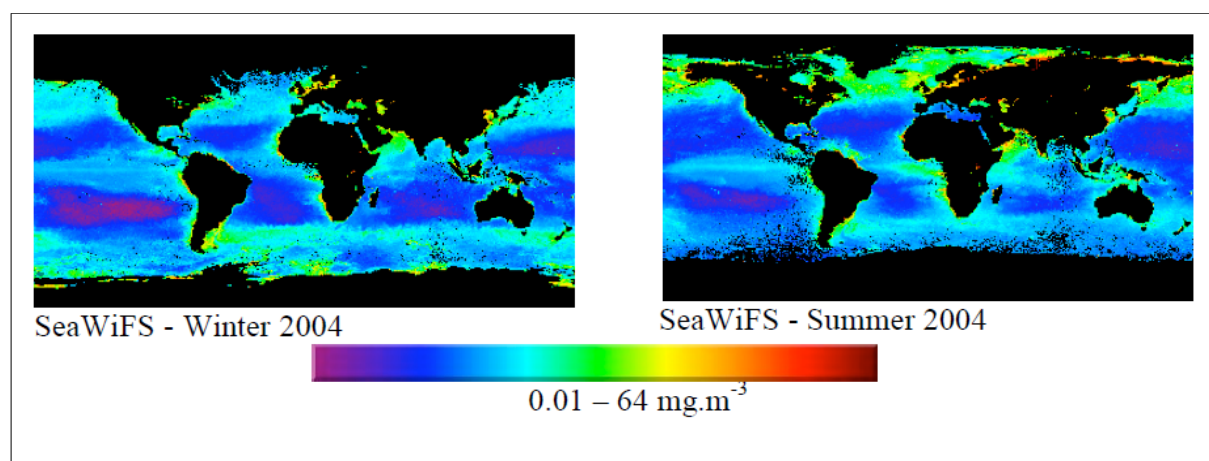


Morel and Prieur, 1977 Analysis of variations in ocean color, Limnol Oceanogr 22, 709-722.



MODIS and SeaWiFS mean nL_w

Sensor parameters	IRS P3-MOS	SeaWiFS	IRS P4-OCM	MODIS
Resolution (km)	0.50	1.1	0.360	1
Swath(km)	200	2801	1420	2330
Repeativity(days)	24	1(revisit)	2	1
Equatorial crossing (hrs)	10:45	12:00	12:00	10:30
Spectral bands (nm)	408±5 443±5 485±5 520±5 570±5 615±5 650±5 685±5 750±5 815±5 870±5 945±5 1010±5	412±10 443±10 490±10 520±10 550±10 670±10 765±20 865±20	412±10 443±10 490±10 510±10 555±10 670±10 765±20 865±20	412.5±7.5 443±5 488±5 531±5 551±5 667±5 678±5 748±5 869.5±7.5
Radiometric quantisation	16	10	12	12
SNR	~400	~500	~350	~1000



Algorithmes pour obtenir la concentration en chlorophylle, matières en suspension

(avec remerciement à P. Gernez, extrait de thèse 2009)

Les algorithmes d'inversion de la [Chl] à partir des mesures de réflectances

Il existe plusieurs approches pour estimer la [Chl] depuis l'espace (Morel et Gordon 1980).

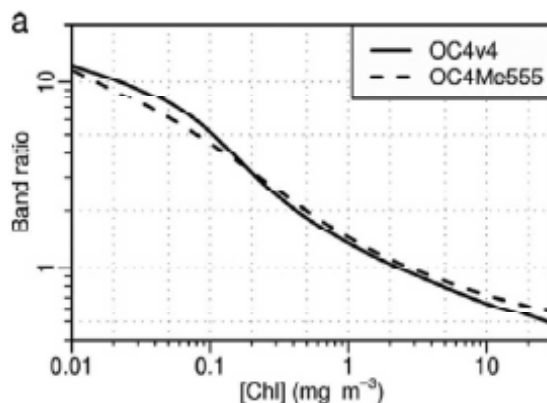
L'approche empirique, initialement développée pour le traitement des données CZCS (Clark 1981) est celle utilisée pour SeaWiFs et MODIS. Les différentes versions des algorithmes OC2, OC3 et OC4 (O'reilly *et al.* 1998) sont basées sur le même principe : établir le meilleur lien statistiques entre des mesures concomitantes de [Chl] et de remote-sensing réflectance R_{rs} . Pour cela, les quantités utilisées sont d'une part, le logarithme de la [Chl] et d'autre part, le logarithme du rapport bleu-sur-vert de réflectance. L'algorithme OC2 (CZCS) utilise comme rapport B/V le rapport $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$, l'algorithme OC3 (MODIS-A) utilise le maximum des rapports $R_{rs}(443)/R_{rs}(551)$ et $R_{rs}(488)/R_{rs}(551)$ et l'algorithme OC4 (SeaWiFs) le maximum des rapports $R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$, $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$ et $R_{rs}(490)/R_{rs}(555)$. Leur structure générale est :

$$[Chl] = 10^{\sum_{n=0}^N a_n R^n},$$

où N (égal à 3 pour OC2 et 4 pour OC3 et OC4) est le degré du polynôme définis par les coefficients a_n .

L'approche semi-analytique est basée sur un modèle bio-optique faisant intervenir les IOPs a et b_b . Dans un premier temps, les quantités a et b_b (ou plus exactement K_d et b) sont reliées de façon empirique à la [Chl] (par ex. Morel et Maritorena 2001; Loisel et Morel 1998). Dans un deuxième temps, les réflectances sont calculées à partir de a et b_b . L'algorithme OC4Me (MERIS) utilise les longueurs d'ondes (443, 490, 510 et 560 nm) et le rapport de réflectances R (pour un soleil au zénith) au lieu des remote sensing réflectances R_{rs} (Morel et Antoine 2007).

L'intérêt de l'approche semi-analytique est qu'il est possible de modéliser toutes les propriétés optiques (dont la R_{rs}) à toutes les longueurs d'onde. ce qui permet la comparaison avec les algorithmes empiriques. Comme le montre la figure ci-dessous, les deux approches donnent des résultats similaires (Morel *et al.* 2007c).



Extrait de Morel *et al.* (2007). Représentation graphique des algorithmes d'inversion de la [Chl] à partir du rapport de réflectance : en continu OC4v4 et en tireté son équivalent de type OC4Me.

Moreover, the differences at the level of individual pixels (which can be as high as a factor of 2) tend to cancel out when computing the spatial means at the scale of the whole Basin, or even of a subprovince, so that the stocks of algal biomass, as estimated by the various sensors, are relatively convergent at these scales. One conspicuous conclusion of this study, however, is the incapacity of any ocean color sensor to reproduce the low chlorophyll concentrations ($<0.15 \text{ mg m}^{-3}$) as observed in situ over large areas of the Basin. The systematic bias appearing between satellite and in situ chlorophyll concentrations appears to originate both from errors in atmospheric corrections and from inadequate bio-optical algorithms (due to peculiar optical properties of Mediterranean waters, see Claustre et al., submitted). The use of a “regional algorithm” allows the bias induced by bio-optical algorithms to be corrected. The problem of locally inaccurate atmospheric corrections, however, has still to be examined and corrected, so as to attempt to put satellite and in situ values in closer agreement.

Temporal variations in primary production appear to be mainly driven by PAR and chlorophyll variations, and to be much less sensitive to variations in seawater temperature. Although primary production computations were performed using a given light–photosynthesis model (Morel, 1991), this conclusion is expected to be maintained for any other model, because the considered model (which ignores any phenomenon of thermal adaptation of algae) likely overestimates the temperature effect upon the phytoplankton growth rate. For “refined” estimates of primary production, it remains nevertheless useful to use seawater temperature data simultaneous to ocean color data as inputs into the model, so as to take into account their possible interannual variations. Reynolds analyses of SST, therefore, appear to be the most appropriate for such computations. The conversion of SST into average temperature for the productive layer, however, is necessary, especially for the spring and summer months where waters are stratified.

Acknowledgments

The authors thank the spatial Agencies NASA, CNES and NASDA for providing the SeaWiFS and CZCS, POLDER, and OCTS data, respectively. We are also grateful to many colleagues for making available their in situ data: H. Claustre, J. Ras, K. Oubelkheir, J.C. Marty, and F. Vidussi (HPLC pigment measurements for the PROSOPE, ALMOFRONT-2, MINOS, and METEOR cruises), J.C. Marty (HPLC measurements at the DYFAMED site), I. Taupier-Letage (fluorometric chlorophyll measurements during the ELISA-3 and ELISA-4 cruises), S. Hooker, A. Morel, F. Fell, and S. Maritorena (radiometric measurements during the PROSOPE, ALMOFRONT-2 and MINOS cruises, respectively). We thank A. Morel for suggestions on an earlier draft, and two anonymous Referees for very useful comments.

This work is a contribution to the ESPER and PROSOPE projects funded by the PROOF (JGOFS-France) national program.

Appendix A. A brief description of the algorithms involved in the OCTS, POLDER-I, and SeaWiFS data processings

A.1. Calibration procedures

The OCTS calibration relies on on-board artificial sources, sunlight observations as well as vicarious calibration. In Version 4.0 products, the calibration factors were tuned so as to match the radiances and chlorophyll *a* concentrations measured in situ in various waters. The dataset used (see Table 4 in Kawamura et al., 1998) seemingly includes a large part of the SeaBAM dataset used for developing SeaWiFS algorithms (see below), which may explain the relatively good agreement with SeaWiFS estimates, in spite of differences in bio-optical algorithms.

The POLDER instrument has no on-board calibration system, and relies on vicarious calibration. Calibration factors for Level 1 radiances at 443 and 490 nm were adjusted by comparing POLDER measurements with radiances at the top of atmosphere, obtained by summing atmospheric path radiances computed for clear atmospheres (low aerosol optical thickness) and water-leaving radiances, measured in selected sites (see Fougnie, Deschamps, & Frouin, 1999).

The SeaWiFS calibration relies both on solar and lunar observations (for temporal degradation), and on vicarious calibration, for adjustment of prelaunch calibration factors. Vicarious calibration operations are based essentially on measurements performed with the MOBY buoy (Clark et al., 1997), and have led to successive revisions of calibration factors for all visible bands.

A.2. Atmospheric corrections

The atmospheric correction procedures are similar for the three sensors. Rayleigh scattering is obtained from precomputed tables, taking into account the actual atmospheric pressure, and multiple scattering and polarization effects. Ozone absorption is corrected using TOMS data. The aerosol radiances are obtained from near-infrared measurements (at 865 and 765 nm for SeaWiFS, or 865 and 670 nm for OCTS and POLDER). They are then compared to aerosol models and extrapolated to the visible domain using look-up tables (which include the effects of multiple scattering and of interactions between aerosols and molecules), according to the scheme developed by Gordon and Wang (1994). SeaWiFS and POLDER aerosol models (Shettle & Fenn, 1979) are similar, while OCTS includes an additional model for Asian dust (see Fukushima et al., 1998). Directional water-leaving radiances are finally

obtained by subtracting Rayleigh and aerosol radiances from the total radiances, and dividing by the total transmission of the atmosphere.

Some refinements in these various steps have been introduced in the SeaWiFS Reprocessing no. 3 (e.g., modified aerosol selection, wind dependence in Rayleigh computations, etc.; see <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/RECAL/Repro3>). In addition, the method proposed by Siegel, Wang, Maritorena, and Robinson (2000) to relax the “black pixel assumption” (i.e., the assumption that the ocean is a black body in the near IR domain, which fails in waters with chlorophyll *a* concentrations > ca. 2 mg m⁻³) has been implemented.

A.3. Bio-optical algorithms

For OCTS, the bio-optical algorithm provides the chlorophyll *a* concentration from a combination of water-leaving radiances at 490, 520, and 565 nm:

$$\text{Chl } a \text{ (mg m}^{-3}\text{)} = 0.2818[(L_w(520) + L_w(565))/L_w(490)]^{3.497}$$

Numerical coefficients were obtained using field observations from various waters around Japan (Kishino, Ishimaru, Furuya, Oishi, & Kawasaki, 1998).

For POLDER, because of problems affecting the calibration of the 443-nm channel, the reprocessing no. 2 uses the OC2 algorithm previously used for SeaWiFS (O'Reilly et al., 1998). This algorithm provides the chlorophyll *a* concentration from the ratio of reflectances at 490 and 565 nm:

$$\text{Chl } a \text{ (mg m}^{-3}\text{)} = 10^{0.341 - 3.001\rho + 2.811\rho^2 - 2.041\rho^3 - 0.040\rho^4}$$

where $\rho = \log_{10}[R(490)/R(555)]$, and *R* is the marine diffuse reflectance under the surface. Numerical coefficients were obtained using the SEABAM dataset of field observations, covering a wide range of waters (see O'Reilly et al., 1998). As the channel available on POLDER is centered on 565 nm instead of 555 nm, *R*(555) is obtained from *R*(565) using the empirical relationship:

$$R(555) = 1.0628R(565) + 0.0015$$

Diffuse reflectances are obtained by combining the directional radiances, which are measured by the POLDER instrument under up to 12 directions for each pixel. The directional radiances for all directions are converted into diffuse reflectances using the *Q* factors from Morel and Gentili (1993), and then averaged (with a weighting function that takes into account the relative intensity of the aerosol scattering in the different directions). Observations are discarded when the aerosol optical thickness at 865 nm is > 0.5.

The algorithm used in the SeaWiFS reprocessing no. 3 is the OC4 algorithm proposed by O'Reilly et al. (1998), with revised numerical coefficients (OC4v4). It provides the

chlorophyll *a* concentration from the “maximum reflectance ratio,” $\rho = \log_{10}[R_{rs}(\lambda)/R_{rs}(555)]$, where *R_{rs}* is the remote-sensing reflectance (i.e., *L_w* divided by the irradiance incident on the sea surface), and *R_{rs}*(λ) is the highest value among *R_{rs}*(443), *R_{rs}*(490) and *R_{rs}*(510):

$$\text{Chl } a \text{ (mg m}^{-3}\text{)} = 10^{0.366 - 3.067\rho + 1.930\rho^2 + 0.649\rho^3 - 1.532\rho^4}$$

A.4. Level 3 composites

The OCTS Level 3 weekly composites are obtained by computing for each “bin” (9 × 9 km at the equator) the geometric mean of chlorophyll *a* concentrations for all pixels in that bin, over 7-day periods (the first period begins on November 3, 1996). Case 2 waters are not identified.

The POLDER Level 3 composites are obtained by computing for each pixel the geometric mean of chlorophyll *a* concentrations over 10-day periods (1st–10th, 11th–20th, 21st–last day of month). The means are computed with a weighting function that takes into account the quality index of the processing. Case 2 waters (identified as in Bricaud & Morel, 1987) are discarded from the means.

The SeaWiFS Level 3 composites are obtained by computing for each bin the arithmetic mean of chlorophyll *a* concentrations over 8-day periods (the first period of each year is forced to begin on January 1). Case 2 waters (identified by a flag on Level 2 products) are not identified on Level 3 composites.

References

- Antoine, D., André, J. M., & Morel, A. (1996). Oceanic primary production: II. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. *Global Biogeochemical Cycles*, 10 (1), 57–69.
- Antoine, D., & Morel, A. (1996). Oceanic primary production: I. Adaptation of a spectral light-photosynthesis model in view of application to satellite chlorophyll observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 43–55.
- Antoine, D., Morel, A., & André, J. M. (1995). Algal pigment distribution and primary production in the Eastern Mediterranean as derived from coastal zone color scanner observations. *Journal of Geophysical Research*, 100, 16193–16209.
- Behrenfeld, M. J., & Falkowski, P. G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42 (1), 1–20.
- Berman, T., Azov, Y., & Townsend, D. W. (1984). Understanding oligotrophic oceans: can the Eastern Mediterranean be a useful model? In: O. Holm-Hansen, L. Bolis, & R. Giles (Eds.), *Marine plankton and productivity* (pp. 101–112). New York: Springer.
- Béthoux, J. P., & Gentili, B. (1999). Functioning of the Mediterranean Sea: past and present changes related to freshwater input and climate changes. *Journal of Marine Systems*, 19, 33–47.
- Béthoux, J. P., Morin, P., Chaumery, C., Connan, O., Gentili, B., & Ruiz-Pino, D. (1998). Nutrients in the Mediterranean Sea, mass balance and statistical analysis of concentrations with respect to environmental change. *Marine Chemistry*, 63, 155–169.
- Bricaud, A., & Morel, A. (1987). Atmospheric corrections and interpretation of marine radiances in CZCS imagery: use of a reflectance model. *Oceanologica Acta*, 33–50 (No SP).

* SEABAM = SeaWiFS Bio-optical Algorithm Mini-workshop (NASA, Jan 97)

919 stations (≈ 20 case 2 stations)
 $C_{0.19} \leq chl a \leq 32.75 \text{ } \mu\text{g } l^{-1}$

Tassan Applied Optics 94 Vol 33 (12) 2369-

Local Algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of
Phytoplankton, suspended sediments & yellow subst. absorpt. in coastal wa

I low chlor. values ($0.025 \leq C \leq 1 \text{ mg.m}^{-3}$)

SeaWiFS	*	$X_c = \frac{R_2}{R_5} \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^{-1.2}$	$0.025 \leq C \leq 1$
1 412		$\log C = 0.0664 + 0.0462 \log X_c - 4.144 \log(X_c^2)$	
2 443			
3 490	*	$X_s = (R_5 + R_6) (R_3 / R_5)^{-0.5}$	$0.07 \leq S \leq 0.56 \text{ g.m}^{-3}$
4 510			
5 555		$\log S = 1.83 + 1.26 \log X_s$	
6 670			
7 765	*	$X_y = \frac{R_1}{R_3} (R_2)^{0.5}$	$0.01 \leq a_y(440) \leq 0.065 \text{ m}^{-1}$
8 865		$\log(a_y(440)) = -3.00 - 1.93 \log X_y$	

C = chlor

S = sediment

Y = yellow matter

II high chlor. values ($1 \leq C \leq 40 \text{ mg.m}^{-3}$)

*	$X_c = \frac{R_2}{R_5} \left(\frac{R_1}{R_3} \right)^{-0.5}$	
	$\log C = 0.36 - 4.38 \log X_c$	
*	$X_s = (R_5 + R_6) (R_3 / R_5)^{-1.2}$	$0.56 \leq S \leq 4.6 \text{ g.m}^{-3}$
	$\log S = 1.82 + 1.23 \log X_s$	
*	$X_y = \frac{R_1}{R_3} (R_2)^{0.25}$	only for $1 \leq C \leq 10$ $0.56 \leq S \leq 2.1$
	$\log(a_y(440)) = -4.36 - 6.08 \log(X_y)$	$0.06 \leq a_y(440) \leq 0.15 \text{ m}^{-1}$

< data from Gulf of Naples -

Exemple d'algorithme « généralisé » pour obtenir la concentration en matières en suspension en eaux côtières

Extrait de *Ouillon et al., Sensors*, **2008**, 8, 4165-4185; DOI: 10.3390/s8074165
Optical Algorithms at Satellite Wavelengths for Total Suspended Matter in Tropical Coastal Waters

Proposal for a global algorithm with threshold

In an attempt to build a better global algorithm, we thus propose to merge the two best-performing relationships in one formulation, following:

(a) turbidity is calculated using algorithm 2:

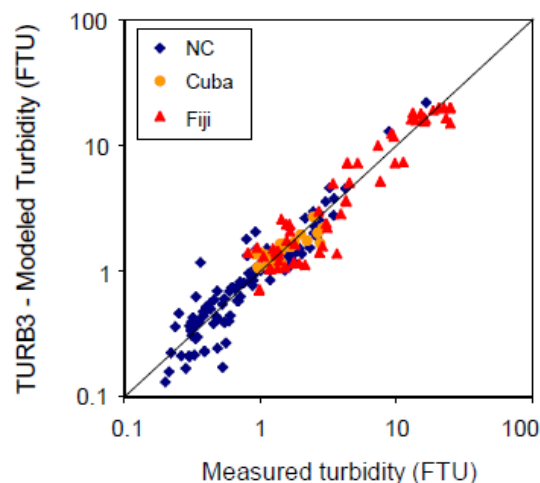
$$\text{Turb} = -6204217 (\text{Rrs681})^3 + 179652 (\text{Rrs681})^2 + 36.49 \text{Rrs681} + 0.452 \quad (6)$$

(b) if the resulting turbidity < 1 FTU, its calculation is replaced by algorithm 6:

$$\text{Turb} = 90.647 (\text{Rrs620} \cdot \text{Rrs681} / \text{Rrs412})^{0.594} \quad (7)$$

As this algorithm is based on three wavelengths (412, 620 and 681 nm, available e.g. with MERIS), we propose to call it hereafter TURB3. Its statistical performances show its ability to estimate turbidity with a mean bias of 3.6%, a rms error of 35% and a mean quadratic error of 1.4 FTU (Table 3, Fig. 12). Algorithm 6 induces lower rms errors both globally and in New Caledonia, but fails to estimate higher turbidity (as indicated by higher rms errors in Cuba and Fiji). TURB3 enables to significantly reduce the mean quadratic error with the Fiji data (2.4 FTU against 3.7 with algorithm 6).

Figure 12. Comparison of measured turbidity (averaged over 3 m below the sea surface) and turbidity calculated from Rrs412, Rrs620 and Rrs681 using TURB3 algorithm (N=193).



Les algorithmes régionaux en Méditerranée

A partir de mesures effectuées le 22 juillet 1992 au large de Gaza, Gitelson *et al.* (1996) proposèrent le 1^{er} algorithme régional. Il s'agit d'une adaptation du modèle global développé pour les eaux du cas 1 par Gordon et Morel (1983) :

$$[\text{Chl}] = 0.914 \left[\frac{R(442)}{R(550)} \right]^{-1.86}.$$

Cet algorithme a été validé par des mesures en Méditerranée orientale entre juillet 1981 et juin 1984 (Berman *et al.* 1984).

A partir des mesures réalisées sur l'ensemble du bassin dans le cadre de l'expérience « SYNoptic Mesoscale and PLankton EXperiment » SYMPLEX (1998-2000), D'ortenzio *et al.* (2002) proposèrent un algorithme régional du type OC2 :

$$[\text{Chl}] = 10^{(0.217 - 2.728R + 0.704R^2 + 0.297R^3)} - 0.035, \text{ où } R = \log_{10} \left[\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right].$$

Cet algorithme est basé sur des mesures acquises dans des zones en majorité oligotrophes (70% des $[\text{Chl}] < 0.1 \text{ mg m}^{-3}$) ; il a été forcé afin de reproduire les valeurs dérivées de l'algorithme OC2 pour les plus fortes concentrations de $[\text{Chl}]$.

A partir de mesures effectuées en septembre 1999 en mer Ionienne et en Méditerranée Occidentale (campagne PROSOPE), entre décembre 1997 et janvier 1998 en mer d'Alboran (campagne ALMOFRONT-2), Bricaud *et al.* (2002) proposèrent :

$$[\text{Chl}] = 2.094 \left[\frac{R(443)}{R(555)} \right]^{-2.357}.$$

Cet algorithme a été validé par les mesures effectuées entre novembre 1996 et juin 1997 à la station DyFaMed et entre mars et juillet 1998 dans le bassin Algérien (campagnes ELISA-3 et -4).

L'algorithme régional le plus récent est le « MedOC », développé par Volpe *et al.* (2007) à partir de données assemblées sur plus de 30 campagnes entre 1997 et 2005 dans l'ensemble du bassin. C'est une adaptation de l'algorithme OC4 :

$$[\text{Chl}] = 10^{(0.4424 - 3.686R + 1.076R^2 + 1.684R^3 - 1.437R^4)},$$

$$\text{où } R = \log_{10} \left(\max \left[\frac{R(443)}{R(555)}, \frac{R(490)}{R(555)}, \frac{R(510)}{R(555)} \right] \right).$$

En Méditerranée, dans les eaux claires, comme cela est montré sur la figure 5-2, le rapport bleu-sur-vert de réflectance est généralement situé au dessous de la loi moyenne (Gitelson *et al.* 1996 ; Bricaud *et al.* 2002 ; D'ortenzio *et al.* 2002 ; Claustre *et al.* 2002b ; Volpe *et al.* 2007). En conséquence, les algorithmes d'inversion basés sur un rapport de réflectance surestiment la concentration en chlorophylle réelle. Cela est illustré en figure 5-3 où l'erreur d'estimation au site BOUSSOLE est indiquée sur des exemples de cartes satellites (SeaWiFs) de [Chl] à six dates choisies entre 2001 et 2006. C'est ce qu'on appelle l'**anomalie de réflectance**, ou **anomalie de chlorophylle**, ou encore **anomalie bio-optique en Méditerranée**.

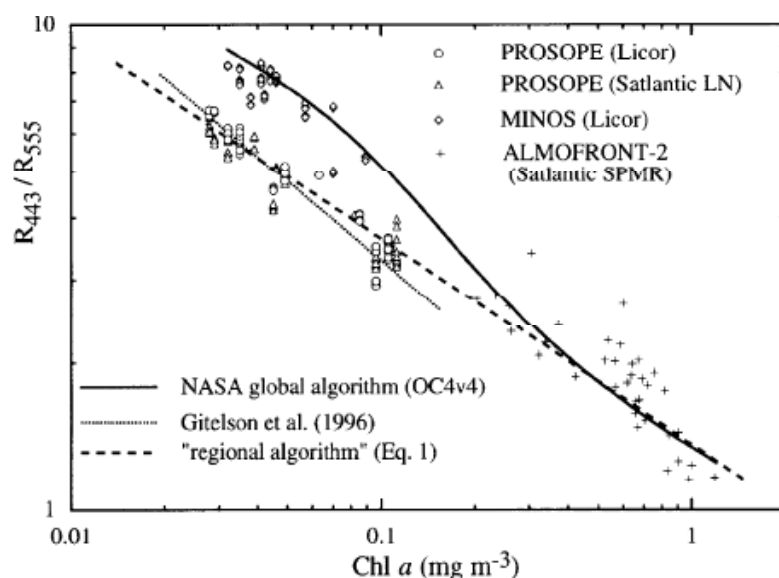


Figure 5-2 Extraite de Bricaud *et al.* (2002). Variations du rapport $R(443)/R(560)$ en fonction de la [Chl]. Les mesures furent réalisées lors de diverses campagnes, comme indiqué. La ligne continue représente l'algorithme standard OC4v4 de la NASA. Les tiretés et les pointillés indiquent les algorithmes régionaux de Bricaud *et al.* (2002) et Gitelson *et al.* (1996).

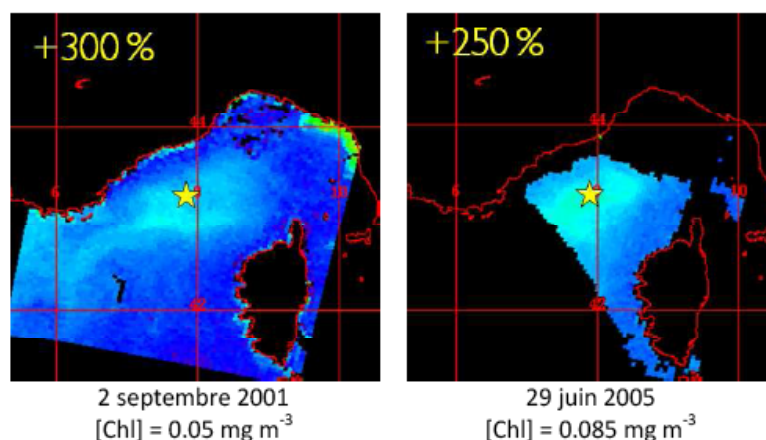


Figure 5-3 Extrait de la présentation « Nuances in case 1 waters optical properties : a case study in the oligotrophic northwestern Mediterranean Sea (BOUSSOLE site) », D. Antoine et A. Morel, *Ocean Optics XVIII*, Montréal, 9-13 Octobre 2006. Exemples de cartes satellites (SeaWiFs, NASA GSFC) au dessus de la mer Ligure, à six dates sélectionnées entre 2001 et 2006. Le site BOUSSOLE est indiqué par une étoile : la concentration en chlorophylle indiquée a été obtenue par HPLC. L'erreur d'estimation est indiquée en jaune en haut à gauche.

Plusieurs hypothèses ont été formulées pour expliquer cette anomalie. D'après Gitelson *et al.* (1996), la surestimation de la [Chl] est lié à un excès de l'atténuation spécifique c_p^* , en raison de la présence de coccolithophoridées et de coccolithes nomades. Cependant, les abondances typiques en coccolithophoridées ne sont pas suffisamment importantes pour expliquer des écarts de diffusion (D'ortenzio *et al.* 2002). Un excès de rétrodiffusion à 555 nm, cette fois causé par la présence d'aérosols en provenance du Sahara, a été proposé (Claustre *et al.* 2002b), mais à ce jour il n'existe aucune évidence directe d'une variation des propriétés optiques en réponse à un dépôt de poussière désertiques. Plus récemment, il a été montré que les eaux Méditerranéennes étaient caractérisées par un excès d'absorption dans la partie bleu du visible, en raison d'une contribution de l'absorption par les substances dissoutes supérieure à la moyenne (Morel *et al.* 2007a ; Morel 2009 ; Morel et Gentili 2009).

Les développements d'algorithmes régionaux ont permis de corriger l'erreur d'estimation de la [Chl] à plusieurs reprises (Gitelson *et al.* 1996 ; Bricaud *et al.* 2002 ; D'ortenzio *et al.* 2002 ; Volpe *et al.* 2007). Ces algorithmes régionaux ont été construits de façon empirique, à partir de données collectées lors d'un certain intervalle de temps et pour certaines zones du bassin. Leur validité au-delà de ces limites n'est pas garantie.

En résumé, les données globales, malgré une forte dispersion, ont permis d'établir des lois moyennes. En Méditerranée, dans les eaux claires ([Chl] < 0.3 mg m⁻³), un écart systématique a été reporté. Il s'agit d'un rapport B/V de réflectance plus faible que prévu. En conséquence, les [Chl] déduites des algorithmes standards de télédétection sont surestimées.

Lorsque $R(490)/R(560)$ est au dessus de la moyenne, l'estimation de la [Chl] par l'algorithme OC4Me (ou par tout autre algorithme standard basé sur un rapport de réflectance) est en dessous de la [Chl] réelle. Au contraire, lorsque $R(490)/R(560)$ est inférieur au rapport moyen, la [Chl] inversée est surestimée. Une telle surestimation a déjà été rapportée à l'issue des campagnes organisées en été (par ex. Claustre *et al.* 2002b). La situation est par contre différente à l'automne et en hiver, où la [Chl] est sous-estimée.

Plusieurs causes peuvent expliquer les écarts par rapport à la loi globale moyenne. Dans le cas d'un rapport B/V au dessous de la moyenne, la raison la plus probable semble être un excès d'absorption causé par les substances dissoutes (par ex. Morel et Gentili 2009). En effet, l'absorption du CDOM augmentant de façon exponentielle quand λ décroît de 700 à 400 nm, une augmentation de CDOM entraîne une augmentation d'absorption plus importante dans le bleu que dans le vert, ce qui entraîne une diminution du rapport B/V de réflectance. Lors des étés 2005 et 2007, on observe une diminution marquée pour $R(442)/R(560)$ et encore plus pour $R(412)/R(560)$, ce qui tend à confirmer l'hypothèse d'un excès de CDOM.

En automne-hiver, le rapport B/V est au-dessus de la moyenne et la concentration en chlorophylle a tendance à être sous-estimée. L'hypothèse de Gernez (thèse 2009) est que:

A l'échelle de la saison, il a été mis en évidence que le cycle annuel des propriétés optiques pouvait expliquer la variabilité naturelle observée dans les relations bio-optiques.

La dispersion n'est pas aléatoire, mais elle s'organise de façon continue suivant l'enchaînement des saisons.

Des relations bio-optiques différentes sont observées d'une saison à l'autre, créant ainsi des écarts par rapport à la moyenne globale. L'amplitude de ces écarts est tantôt faible, tantôt marquée, donnant alors lieu à des anomalies bio-optiques. Les anomalies bio-optiques ne sont pas des cas à part mais s'intègrent complètement dans le cycle saisonnier de la [Chl] et des propriétés optiques.

Des anomalies positives peuvent être engendrées dès le début de la stratification, par augmentation progressive du rapport $a(442) / a(555)$ dans la partie bleu du spectre du visible.

Des anomalies négatives peuvent être engendrées à l'automne, lors de la transition d'une situation estivale stratifiée à un régime mélangé en hiver, en raison d'un déficit de rétrodiffusion (par rapport aux lois globales moyennes).

Le modèle régional MedOC de Volpe *et al.* (2007) décrit bien la partie inférieure du nuage de points correspondant aux anomalies positives. Cependant son application systématique conduirait à des sous-estimations importantes de $[\widehat{\text{Chl}}]$. De manière générale, l'utilisation d'un algorithme régional, quel qu'il soit, est à proscrire : dans certains cas l'estimation sera améliorée, mais dans d'autres cas elle sera de moins bonne qualité qu'avec la méthode globale.

La saisonnalité de l'erreur est illustrée par le fait que les anomalies positives concernent généralement les $[\text{Chl}]$ inférieures à 0.3 mg m^{-3} . Cela est également confirmé par la position sous la loi de moyenne de MM01 des points des autres campagnes méditerranéennes, toutes réalisées en été (MINOS en juin, AOPEX en août et PROSOPE en septembre).