

Chapitre VII - INSTRUMENTATION

Les analyses chimiques classiques, réalisées sur des échantillons prélevés en mer à intervalle plus ou moins espacés, fournissent une description précise du contenu de l'eau de mer. Leur représentativité n'est pas assurée, en raison notamment des possibles altérations du contenu des échantillons entre le lieu de prélèvement et le lieu d'analyse. Les analyses chimiques sont donc basées sur des mesures intrusives réalisées de façon discrète.

A l'opposé, un certain nombre de propriétés optiques sont mesurables directement sur le terrain, de façon continue et non intrusive, permettant ainsi d'en étudier de manière plus fine les variations spatiales et temporelles.

En particulier, la mesure de la réflectance est réalisable depuis l'espace à l'aide de radiomètres embarqués sur satellite. Les mesures de télédétection donnent une vue complète de la biosphère. Les variations dynamiques de la biomasse (c'est-à-dire la concentration en chlorophylle) sont ainsi étudiées de façon locale (à l'échelle d'un bassin) et globale (sur l'ensemble des océans de la planète) avec une résolution temporelle de quelques jours seulement.

Les mesures de télédétection réalisées depuis l'espace permettent de suivre les variations décennales, ce qui est extrêmement important pour évaluer la réponse de la biosphère aux variations climatiques (par ex. Antoine *et al.* 2005, Behrenfeld *et al.* 2006).

Quelles sont les grandeurs biogéochimiques accessibles par l'optique marine ?

Dans l'océan ouvert (c'est-à-dire au large, loin de l'influence des côtes), les changements de propriétés optiques sont généralement organisés en lien avec les variations de concentration en chlorophylle, notée [Chl] (Smith et Baker 1978). Comme de plus, ce pigment, présent uniquement dans les cellules de phytoplancton, est régulièrement mesuré lors des campagnes en mer, la [Chl] est devenu un paramètre couramment utilisé pour décrire la biomasse phytoplanctonique. Par extension la [Chl] est également utilisée comme indicateur de l'état trophique et de l'abondance des diverses particules et substances accompagnant le phytoplancton. Ce constat est la base de la notion des eaux du cas 1 (Morel et Prieur 1977).

Les algorithmes opérationnels d'estimation de la [Chl] depuis la mesure de réflectance (voir chapitre 8) ont un degré d'incertitude d'environ 30% (par ex. Gregg et Casey 2004), pour la moyenne des océans du globe. Des déviations régionales, en particulier en Méditerranée, ont été rapportées.

Pour l'étude du cycle océanique du carbone, ce n'est cependant pas seulement la [Chl] qu'il s'agit de mesurer, mais également les concentrations en carbone organique particulaire et dissout, notées par convention POC et DOC (pour « Particulate Organic Carbon » et « Dissolved Organic Carbon ») (JGOFS, 1996). Il est difficile d'estimer la concentration en DOC à partir des mesures optiques car une fraction variable de DOC reste « invisible ». En revanche, il est possible de déterminer le coefficient d'absorption de la matière dissoute colorée (en anglais CDOM pour « Colored Dissolved Organic Matter ») (par ex. Siegel *et al.* 2002, Brown *et al.* 2008, Morel et Gentili 2009). Les relations entre le DOC et le CDOM sont mal connues, car on ne sait pas exactement quelle fraction de CDOM est contenue dans le DOC (et vice versa). Le POC est directement quantifiable par la mesure du coefficient de diffusion (Morel 1988). Depuis l'espace, des algorithmes semi-analytiques (par ex. Loisel *et al.* 2001, 2002) et empiriques (Gardner *et al.* 2006, Stramski *et al.* 2008) ont été récemment développés, avec une incertitude de l'ordre de 20% (Stramski *et al.* 2008).

L'analyse de la « signature optique » d'un échantillon d'eau de mer peut également donner des informations sur la distribution de taille des particules (par ex. Kitchen *et al.* 1982, Boss *et al.* 2001, Loisel *et al.* 2006), leur caractère biogène ou minéral (par ex. Twardowski *et al.* 2001, Loisel *et al.* 2007), et, pour les communautés phytoplanctoniques, un indice sur leur structure de taille (par ex. Ciotti *et al.* 2002, Ciotti et Bricaud 2006), de groupe fonctionnel (par ex. Alvain *et al.* 2005) ou encore sur leur état physiologique, notamment le niveau de photoacclimatation (par ex. Behrenfeld et Boss 2003).

Perspectives actuelles en optique marine

Depuis quelques années, l'estimation des nouveaux indices bio-optiques évoqués dans la section précédente est en plein essor. La motivation sous-jacente provient du fait qu'une fois la quantité de biomasse (en terme de [Chl] ou de POC par exemple) connue, il est nécessaire de caractériser plus en détail l'assemblage dissout et particulaire pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes et leur rôle dans les cycles biogéochimiques. Ainsi, par exemple, il est utile d'évaluer la structure de taille des populations de phytoplancton pour estimer les paramètres photosynthétiques (Uitz *et al.* 2008) et la production primaire (Silio-Calzada *et al.* 2008). De même, l'estimation de l'état de photoacclimatation du phytoplancton ouvre la voie à de nouvelles interprétations des champs de [Chl] (par ex. Westberry *et al.* 2008).

Pour que toutes ces nouvelles informations soient réellement utilisables de façon opérationnelle, notamment dans les modèles biogéochimiques (par ex. Bopp *et al.* 2005), un effort important de validation doit être fourni. Il est extrêmement difficile d'effectuer une validation à grande échelle entre les nouveaux indices bio-optiques et leurs équivalents biogéochimiques. Tout d'abord, cela nécessite un investissement humain et matériel considérable. De plus, la comparaison entre les grandeurs optiques et biogéochimiques n'est pas immédiate, en raison des différences de stratégie d'échantillonnage (prélèvements discrets en biogéochimie, observations non-intrusives et continues en optique). Une difficulté supplémentaire provient également du fait que les grandeurs mesurées ne sont tout simplement pas comparables.

L'exemple de la mesure de la distribution de taille est révélateur des difficultés rencontrées. D'un côté, il existe une approche optique, basée sur la dépendance spectrale du coefficient de diffusion. Plus précisément, cette approche permet d'estimer la pente moyenne de la loi de distribution, sur un intervalle de taille entre environ 0.1 et 20 microns (par ex. Boss *et al.* 2001). De l'autre côté, le comptage classique des particules présentes dans un échantillon d'eau de mer ne permet pas de mesurer l'abondance des particules inférieures à \sim 1 micron (par ex. Jackson *et al.* 1997). Une incertitude importante sur l'intervalle \sim [0.1 ; 1] μm existe donc. Ces particules submicroniques sont mal connues, ce qui pose de nombreux problèmes sur l'analyse des propriétés optiques (Stramski et Kiefer 1991).

Il est probable que les années à venir seront marquées par l'utilisation de nouveaux instruments, comme par exemple des appareils imageurs (par ex. Olson *et al.* 2003, Olson et Sosik 2007), capables de concilier les mesures optiques et biogéochimiques. Une étape importante dans la validation des nouveaux indices bio-optique de caractérisation particulaire est aussi de continuer à étudier, sur le terrain, les relations qui existent entre les propriétés optiques apparentes et les propriétés optiques inhérentes. Cette étape est indispensable avant d'exporter les algorithmes à une application satellite (voir chap 8).

(extraits de thèse de P; Gernez, 2009).

A) Radiomètres

Les radiomètres peuvent être utilisés sur des bathysondes, des mouillages ou autres plate-formes in situ (AUVs, gliders, profileurs ondulés...). Néanmoins, il faut faire attention aux problèmes d'ombrage ou d'angle de visée de l'instrument. Les radiomètres peuvent aussi être embarqués sur satellite.

Radiometres

multispectral			
	OCR-500 micro-sensor	wavelengths (voir attache)	Satlantic
	OCR-504 UV	305, 325, 340, 380 nm	
	OCR-507I	E at 7 wavelengths	
	OCR-507R	L at 7 wavelengths	
	PRR-800	Ed and Eu (or Lu) measured at 15 to 19 wavelengths + Twater + pressure	Biospherical
	PUV	Ed at 305, 313, 320, 340, 395 nm + PAR + Twater + pressure	
hyperspectral			
	HyperOCR	256 wavelengths between 350 to 800 nm	Satlantic
	HydroRad	Fiber optics technology between 350 and 850 nm: res=0.3 nm extended 250 to 1050 nm: res=0.4 nm	Hobilabs about 1500 wavelengths
	Walrus	hyperspectral radiometer bouy above and below the surface	Hobilabs

www.satlantic.com

OCR= Ocean Color Radiometer

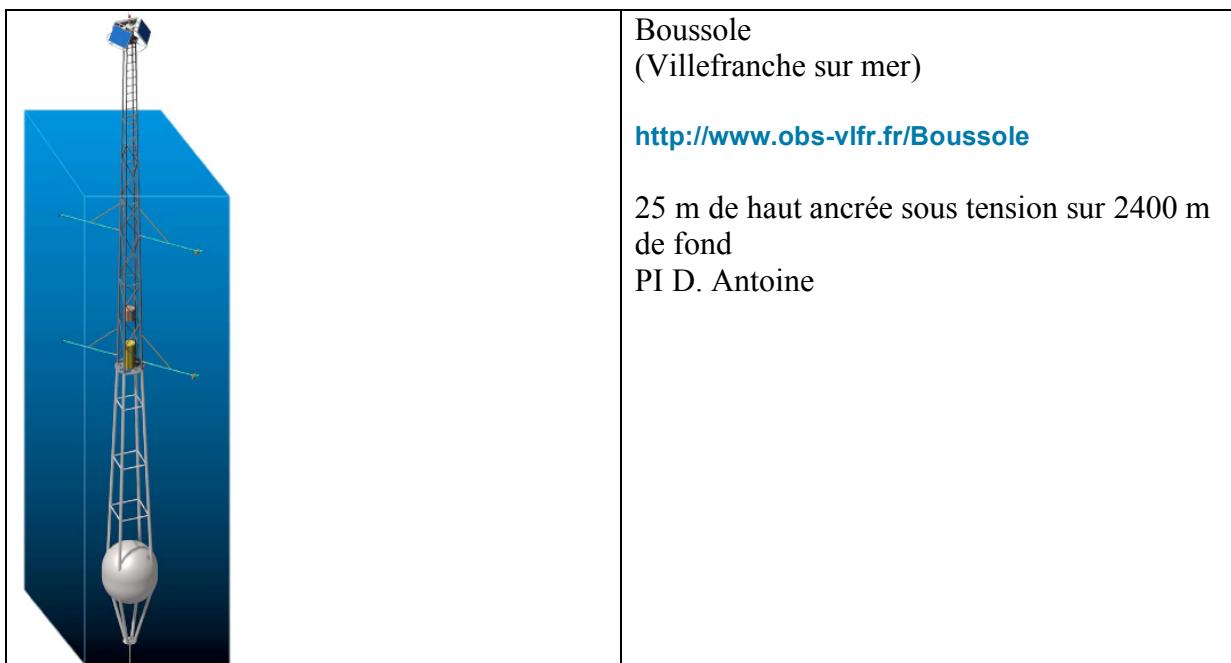
SAS=Surface Acquisition Systems

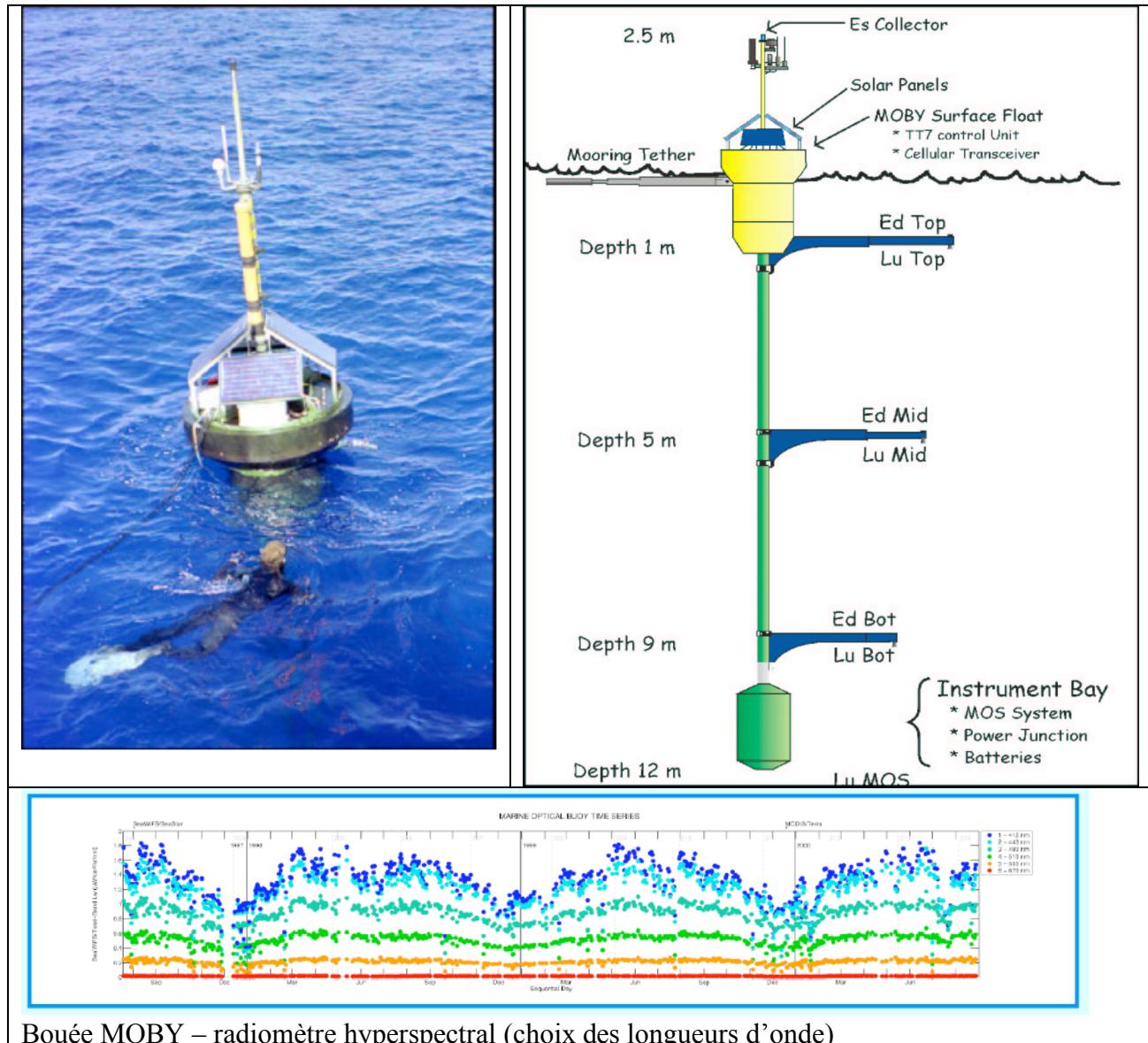
wide field of view

narrow field of view

www.biospherical.com

PRR=Profiling Reflectance Radiometers





Bouée MOBY – radiomètre hyperspectral (choix des longueurs d'onde)

B) Instruments mesurant les IOPs

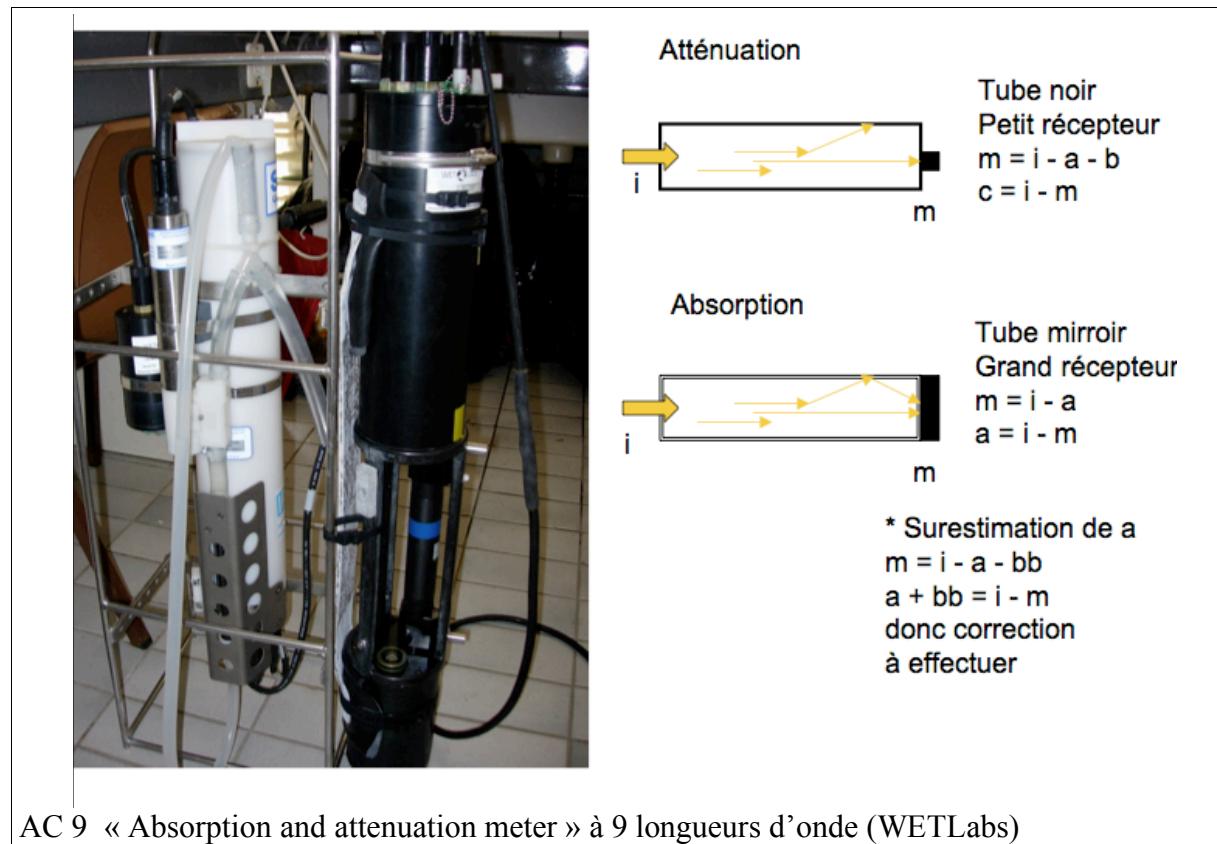
Fournisseur HOBI Labs

Hydoscat-n (n=2, 4, 6) Backscattering ($\beta[140^\circ]$ and bb) at multiple wavelengths + fluorescence

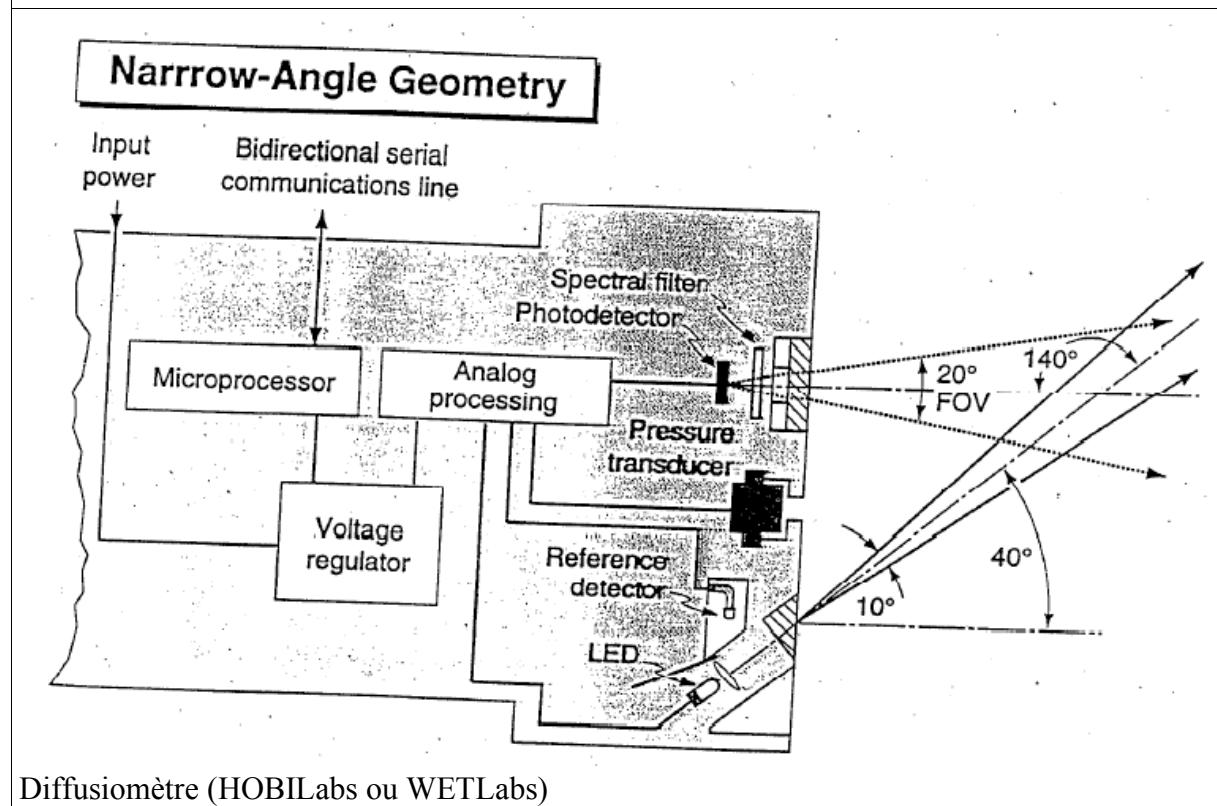
Fournisseur WETLabs

Product	Instrument Description
ac-9	Absorption and Attenuation Meter ; $\lambda = 412, 440, 488, 510, 560, 630, 650, 676$, and 715 nm
ac-9 Plus	Absorption and Attenuation Meter, expanded data handling capabilities
ac-spectra	Multispectral Absorption and Attenuation Meter ; 80 longueurs d'onde λ ; $\Delta\lambda = 4$ nm ; de 400 à 730 nm
C-Star	Transmissometer ; $\lambda = 660$ nm
C-Rover	Transmissometer built for profilers
DH-4	Data Handler
ECO BB	Single-Angle Scattering Meter ; $\psi = 117^\circ$
ECO BB2F	Combination Scattering Meter and Fluorometer; $\psi = 117^\circ$ at $\lambda = 470, 700$ nm + chlor fluor (425 – 675 nm)
ECO BB3	Three-wavelength Scattering Meter ; $\psi = 117^\circ$ (ou 140°); $\lambda = 470, 532, 660$ nm
ECO FL	Open-face Chlorophyll Fluorometer
ECO FLNTU	Combination Chlorophyll Fluorometer and Turbidity Sensor
ECO Pucks™	Miniature ECO for AUVs, gliders, profiling floats
ECO Triplet	Custom three-channel sensor
ECO VSF	Three-angle Backscattering Meter; $\psi = 117^\circ, 125^\circ$ et 140°
ECO VSF3	Three-angle, Three-wavelength Backscattering Meter $\psi = 117^\circ, 125^\circ$ et 140° $\lambda = 450, 530, 650$ nm
SAFire	Spectral Fluorescence Meter
WETPak	Battery Pack
WETStar (Chl)	Chlorophyll Fluorometer
WETStar (CDOM)	CDOM Fluorometer

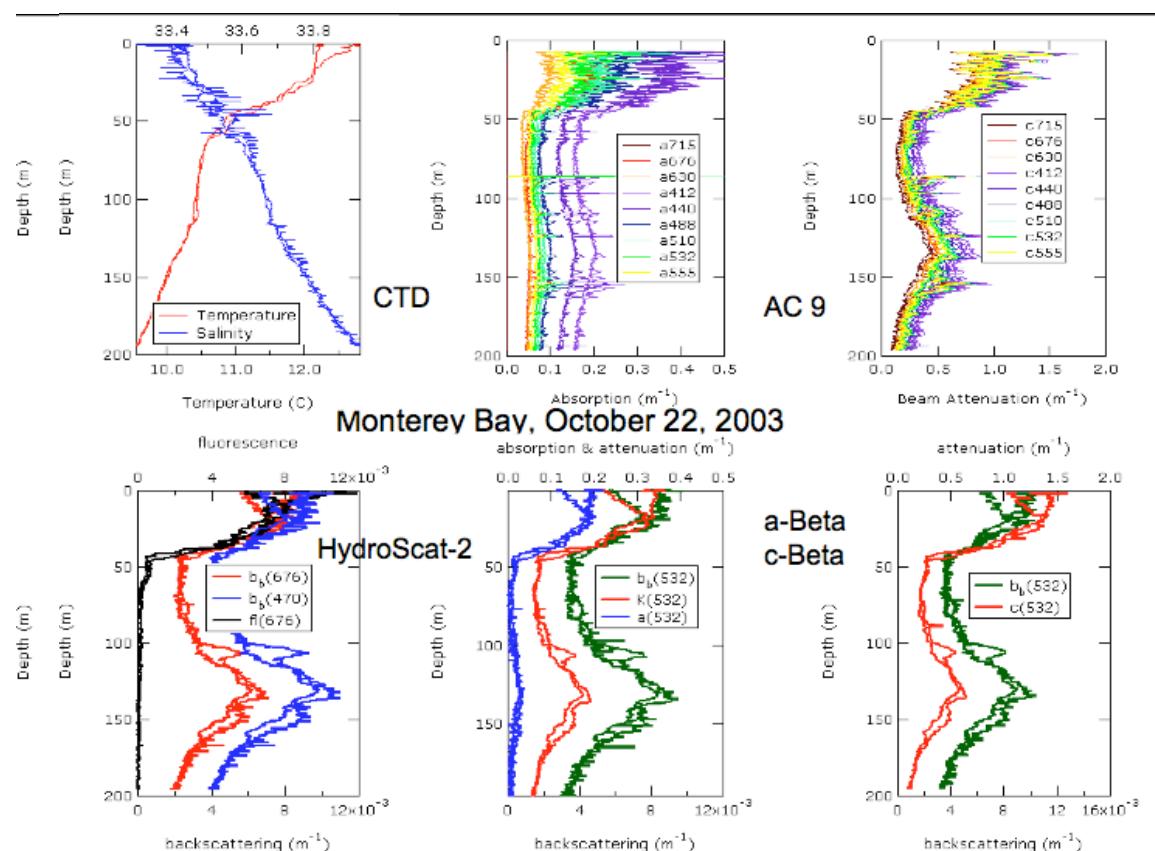
Description de quelques instruments



AC 9 « Absorption and attenuation meter » à 9 longueurs d'onde (WETLabs)



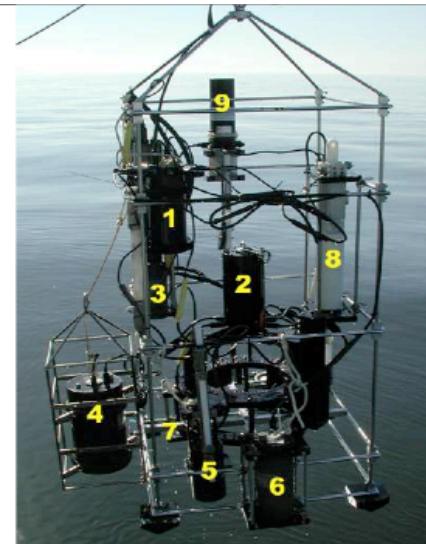
Diffusiomètre (HOBILabs ou WETLabs)



HOBI LABS

HydroProfiler

#	Instrument	Measurement(s)
• 1	HydroDAS	Controller
• 2	HydroBeta	volume scattering function
• 3	WET Labs AC9	absorption, attenuation
• 4	HydroScat-6	backscattering, fluorescence
• 5	a-Beta	backscattering, attenuation, absorption
• 6	HydroScat-4	backscattering
• 7	HydroScat-2 (back side of profiler)	backscattering, fluorescence
• 8	Seabird SBE-19	conductivity, temperature
• 9	Biospherical PRR-600	downwelling irradiance (separate upwelling radiance head on bottom rear)
• 10	c-Beta (back side of profiler, not visible)	backscattering, beam attenuation



WET Labs ac-s - Culture of *Chaetoceros rostratus*.

$$apg = a - aw = ap + ag$$

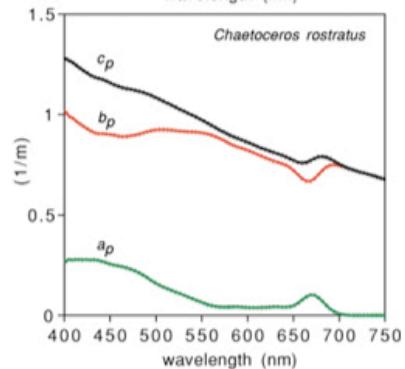
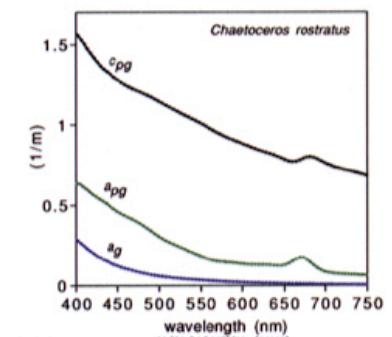
$$cpg = c - cw$$

(a_g measured by filtering the sample through a 0.2 mm filter).

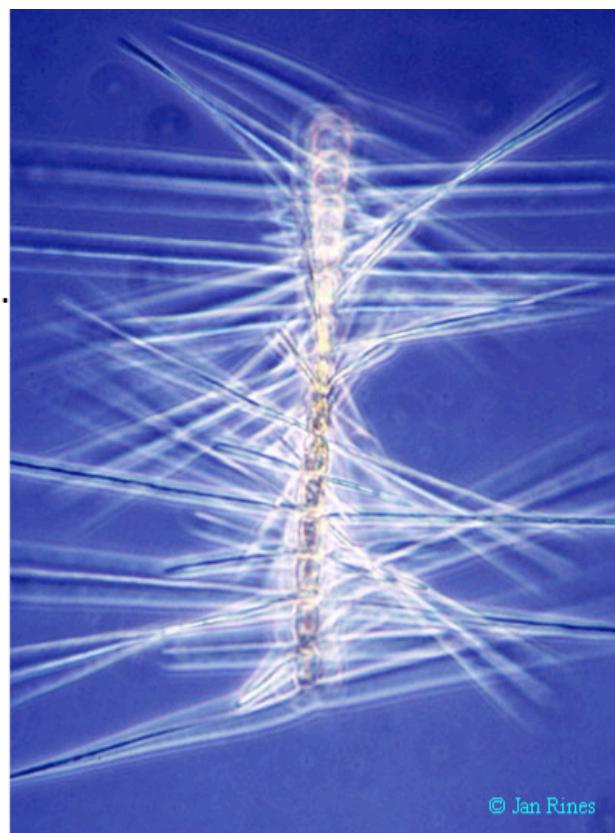
In the lower figure $ap = apg - ag$

$$bp = cpg - apg$$

Hyp: dissolved materials do not scatter.



View photomicrographs of *Chaetoceros rostratus*. (courtesy Dr. Jan Rines, University of Rhode Island).



© Jan Rines

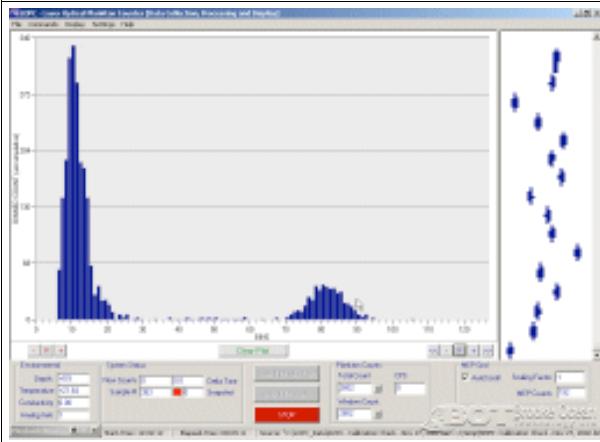
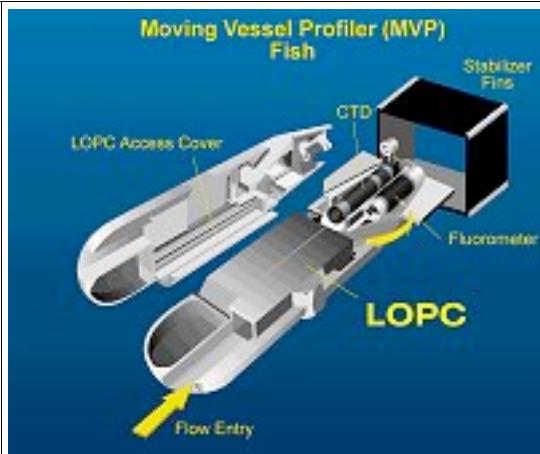
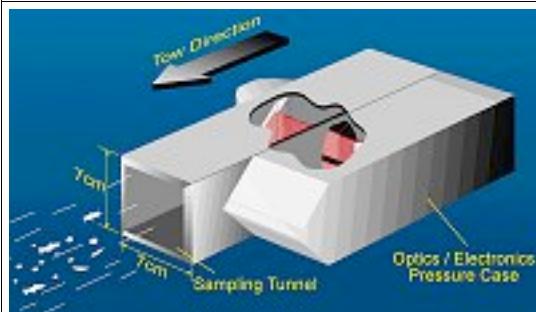
Pour mesurer les particules ou la taille des particules

LOPC = Laser Optical Plankton Counter (Brooke Ocean, NS, Canada)

Particle size range: 100 µm – 40 mm

The Laser Optical Plankton Counter (ODIM LOPC) is the next generation in plankton profiling. The ODIM LOPC's high speed processing and improved detection plane provides detection counts at higher resolutions and higher concentrations with lower coincidence. This also allows the LOPC to be integrated into tow bodies such as the Moving Vessel Profiler (MVP™), traveling at up to 12 knots and still providing reliable data. However, the LOPC is designed to be adaptable to any tow body and operate stand-alone as well.

The LOPC is capable of providing cross-sectional shape profiles of plankton $>1\text{mm}$ and $\leq 40\text{mm}$. The larger the animal size, the better the resolution of the shape, eg. euphausiids can be clearly resolved using a larger volume tunnel.



Improved Interface Software – The ODIM LOPC Interface Software offers real-time data collection and graphical display.

<http://www.brooke-ocean.com/lopc.html> – The Laser Optical Plankton Counter was developed by Dr. Alex Herman at the Department of Fisheries and Oceans, Ocean Sciences Division, Bedford Institute of Oceanography, Canada.

LISST = Laser In-Situ Scattering and Transmissometry (Sequoia, Bellevue, WA)

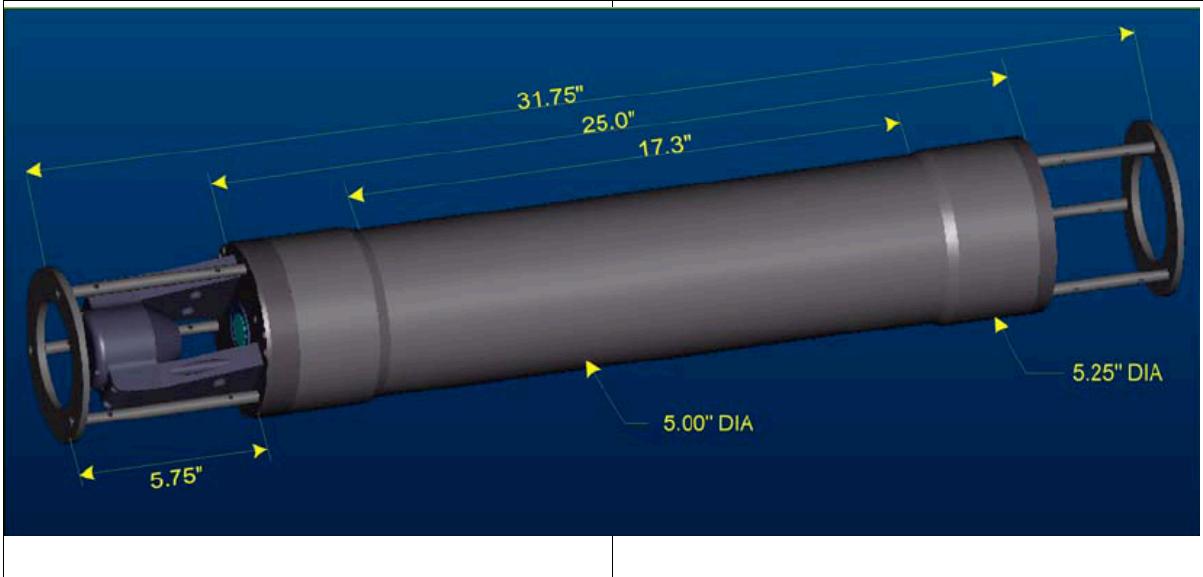
Particle size range: 1.25 μm – 250 μm ou 2.5 - 500 μm

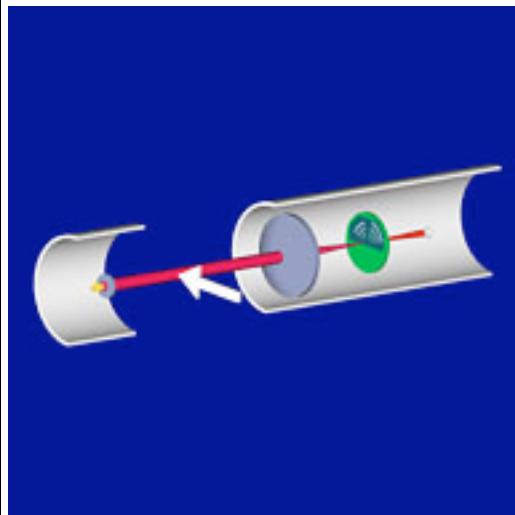
The instrument is fully self-contained with battery and data-logger. It can be used with supplied programs, or in specially designed modes, e.g. event triggered based on storms (pressure variance) or fronts (temperature front). Two size-ranges are available: 1.25–250 microns (Type-B) and 2.5–500 microns (Type-C). Standard memory size is 128MB, suitable for storing approximately 1,600,000 size distributions, with option to expand to 1GB, or 12,800,000 size distributions. Special versions are available for deep-ocean, high-concentration, or low-concentration environments.

Principle : At the heart of the instrument is a collimated laser diode and a specially constructed annular ring detector.

Scattering at 32 angles is the primary information that is recorded. This primary measurement is mathematically inverted to get the size distribution, and also scaled to obtain the volume scattering function (VSF). The size distribution is presented as concentration (micro-l/l) in each of 32 log-spaced size bins. Optical transmission, water depth and temperature are recorded as supporting measurements.

<http://www.sequoiasci.com/>





Sequoia is the sole manufacturer of the LISST series laser sediment/particle/bubble/droplet sensing instruments. Some of these instruments deliver the optical volume scattering function (VSF) of interest to optical oceanographers.

The LISST series includes submersible and non-submersible instruments. All employ the small-angle forward scattering principle, also called low-angle laser scattering or laser diffraction.

Moving Vessel Profiler with LISST – LOPC



Towing speed:
6 – 12 knots

Profile depth:
400 – 800 m

Sensors:



Pour mesurer les sels nutritifs

Capteurs de Nutriments (commercialisés)

= > 2 principales technologies:

- **Optique** (ex: **In Situ Ultraviolet Spectrophotometre** pour nitrates): mesure du spectre d'absorption mais problème de consommation d'énergie et de sensibilité (LD = 0.5 μ M) et non disponible pour tous les nutriments
- **Analyse chimique** = Méthodes d'autoanalyse standard; = la plus performante à l'heure actuelle (LD ~ 0.05 μ M); durée de déploiement de plusieurs mois (> 4 mois); = sur différents types de plateformes autonomes (mouillage, AUV le subchem de Wetlabs)
Mais problème = instrumentation complexe : dispositifs **lourds** (environ 10 – 30 kg, **encombrants** 0.5 m³) ; **chers** (entre 10 et 100 k€) ; maintenance technique lourde.

• Analyseur de nutriment multiparamètres



EcoLAB (EnviroTech)



**SubChemPak Analyzer
(Subchem Syst./WetLabs)**



**NPA (Systea)
(nutrient probe
analyzer)**

• Analyseur de nutriment mono-paramétrique



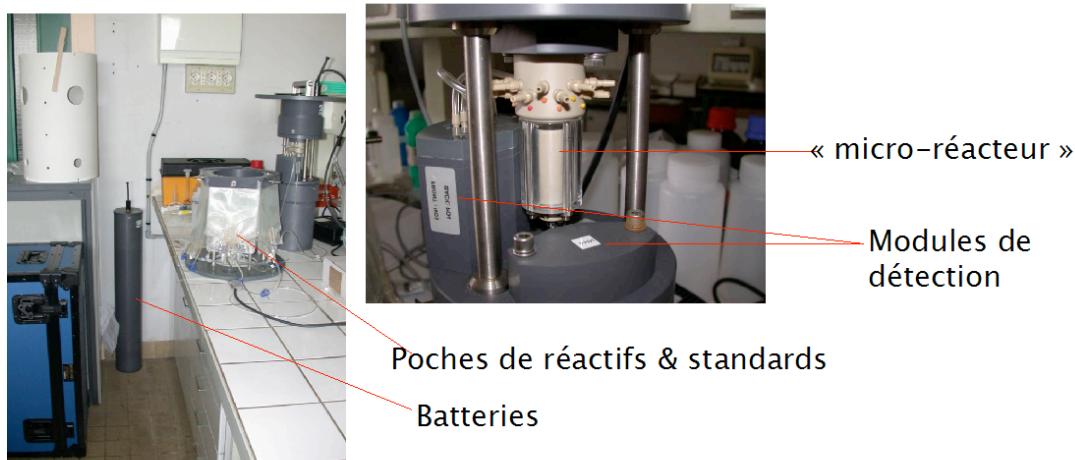
9600 Nitrate Monitor (YSI)



Cycle-PO4 (WetLabs)

Analyseur EcoLAB (EnviroTech Instrument)

- Mesure successive de 5 paramètres (Nitrate, nitrite, phosphate, silicate et ammonium)
- Durée de déploiement: jusqu'à 6 mois
- Submersible jusque 250 m de profondeur



=> Application directe sur les stations d'observation : JULIO (MOOSE); GOPS

Problèmes des techniques in situ:

1. Biofouling
2. Endurance (source d'énergie)
3. Capacité de stockage des données

- ⇒ toutes ces difficultés se combinent et sont une source d'erreur sur les données acquises
- ⇒ c'est pourquoi les données de capteurs sont considérées, le plus souvent, comme des grandeurs relatives et non absolues!
- ⇒ Actuellement, les techniques in situ ne remplacent pas les techniques de laboratoire: elles sont complémentaires!