

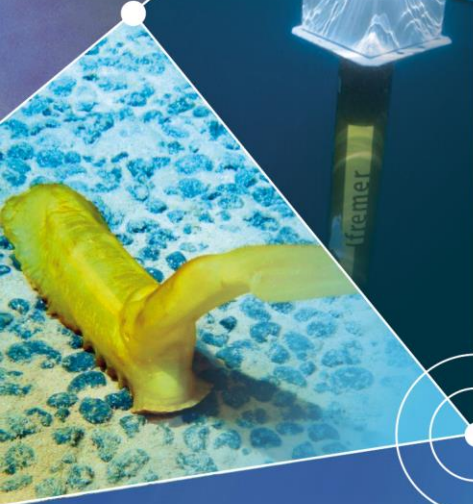
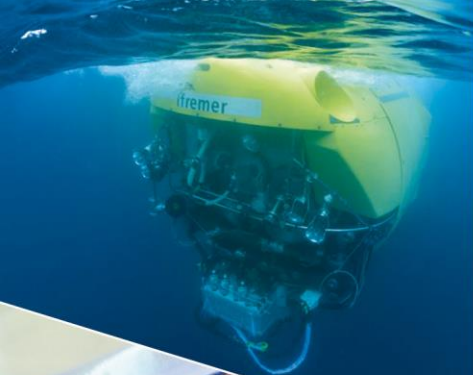


Les défis de la métrologie

L'optique pour la métrologie marine

Olivier Fauvarque – Ifremer Brest
Unité Recherche & Développement
Laboratoire Détection, Capteurs & Mesures

Journées Métrologie Optique & Instrumentation
Webinaire du 4 Février 2021



Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

EPIC

Établissement Public à caractère
Industriel et Commercial

Budget : 200 millions d'euros

5 centres

1500 salariés



Missions

- Appui à la puissance publique
- Valorisation économique
- Recherche et Développement
- Gestion de la flotte

Connaissances fondamentales
Exploration & Surveillance
Expertise & Conseil



Navire océanographique Thalassa Ifremer S. Lesbats

Le Contexte

L'observation de l'océan

Des réseaux d'observatoires

Des milieux aux contraintes instrumentales variées

Les capteurs optiques omniprésents

Un florilège de techniques

Des protocoles métrologiques spécifiques

Contexte



Deep Space
Climate
Observatory

Biodiversité

96 % du volume biosphérique

Climat

Immense inertie thermique

Capte ¼ du CO₂ émis

Principal régulateur du climat

Economie

1/5 population à moins de 30 km de la mer

90 % du commerce mondial

**Ressources halieutiques, minérales,
énergétiques...**

2.1.7. Preserving and restoring ecosystems and biodiversity

“The Commission will identify which measures, including legislation, would help Member States improve and **restore** damaged **ecosystems to good ecological status**, including carbon-rich ecosystems. “

“The sector can contribute by **improving the use of aquatic and marine resources** and, for example, by promoting the production and use of new sources of protein that can relieve pressure on agricultural land.”

2.1.8. A zero pollution ambition for a toxic-free environment

“To protect Europe’s citizens and ecosystems, the EU needs to **better MONITOR, report, prevent and remedy pollution from air, WATER, soil, and consumer products.** “

“In addition, the Commission will propose measures to **address pollution** from urban runoff and from new or particularly harmful sources of pollution **such as micro plastics and chemicals**, including pharmaceuticals. “

Quelles grandeurs observer ?



The Global Ocean Observing System



Essential Ocean Variables

PHYSICS	BIOGEOCHEMISTRY	BIOLOGY AND ECOSYSTEMS
Sea state	Oxygen	Phytoplankton biomass and diversity
Ocean surface stress	Nutrients	Zooplankton biomass and diversity
Sea ice	Inorganic carbon	Fish abundance and distribution
Sea surface height	Transient tracers	Marine turtles, birds, mammals abundance and distribution
Sea surface temperature	Particulate matter	Hard coral cover and composition
Subsurface temperature	Nitrous oxide	Seagrass cover and composition
Surface currents	Stable carbon isotopes	Macroalgal canopy cover and composition
Subsurface currents	Dissolved organic carbon	Mangrove cover and composition
Sea surface salinity		Microbe biomass and diversity (*emerging)
Subsurface salinity		Invertebrate abundance and distribution (*emerging)
Ocean surface heat flux		

Critères de sélection

Pertinence scientifique
Faisabilité technique

Spécifications instrumentales

Justesse
Limite de détection
Résolution
Gamme de mesure

Temps de réponse
Répétabilité
Dérives
...

Étalonnage

Procédures documentées
Standardisation & harmonisation des étalonnages
Possibilité d'autocalibration *in situ*

Format des données

Lien avec les unités du SI
Harmonisation des mesures
Accord avec les bases de données historiques

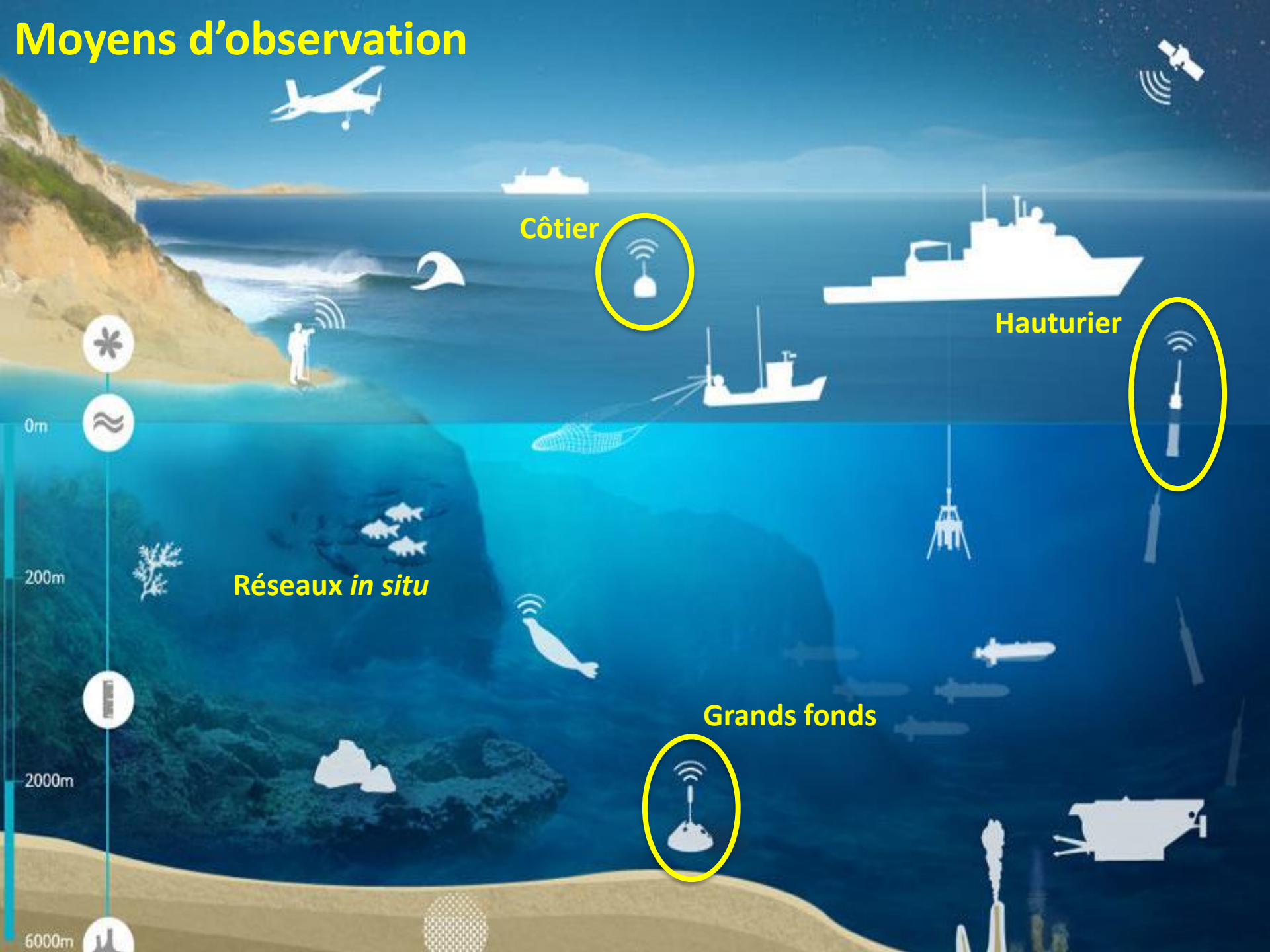
Cadre théorique

Cohérence des données avec les équations/modèles

Echantillonnage

Mesures à l'échelle globale
Représentativité de l'échantillonnage

Moyens d'observation



Côtier

Hauturier

Réseaux *in situ*

Grands fonds

0m

200m

2000m

6000m

Les réseaux d'observatoires

**Une grande disparité de milieux
& des contraintes instrumentales variées**

1. Côtier

2. Grands fonds

3. Hauturier

Bouée Marel Iroise en rade de Brest

G. Charria Ifremer



Mesures **A**utomatisées en **R**éseau pour l'Environnement et le Littoral

Mesures *in situ* & en continu

Relevage des sondes tous les deux mois & étalonnage

Salinité

Pression

Température

Conductivité

O₂ dissous

Turbidité

pH fluorescence

+ Station météo

<http://www.ifremer.fr/co-en/eulerianPlatform?contextId=395&ptfCode=6200450&lang=en#156>

Platform code	8200450
Platform name	Iroise Stanne
Description	Bouée Stanne du Réseau Marel-Iroise
Institution(s)	IFREMER, Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer INSU, Institut National des Sciences de l'Univers Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) University of Western Brittany (UBO)
Logo(s)	
Nominal Latitude	48.35798
Nominal Longitude	-4.55175
Ptt	0x3f
Eulerian networks	Marel
Available data	From 19/07/2000 to 27/10/2020
Selected data	From <input type="text" value="27/09/2020"/> ... to <input type="text" value="27/10/2020"/> ... <input type="button" value="Refresh"/>
Filters	<input checked="" type="checkbox"/> Good measures only <input checked="" type="checkbox"/> Physical parameters only <input checked="" type="checkbox"/> One color by quality code <input type="checkbox"/> One color by immersion level
Download time series	To download data, please login here
Physical parameters	<input checked="" type="checkbox"/> Depth, Practical salinity, Sea temperature, Electrical conductivity, Dissolved oxygen, Atmospheric pressure at sea level, Horizontal wind speed, Wind from direction relative true north, Air temperature in dry bulb, Relative humidity, Oxygen saturation, Gust wind speed, pH, Turbidity, Altitude, Fluorescence, Surface incoming photosynthetic active radiation, Gust wind from direction relative true north
Depth	<input checked="" type="checkbox"/> <input data-bbox="241 664 266 682" type="button" value="+"/>
Practical salinity	<input checked="" type="checkbox"/> <div style="display: flex; align-items: flex-start; margin-top: 10px;"> <div style="margin-right: 10px;"> <input type="text" value="35.68"/> <input type="text" value="33.81"/> <input type="button" value="Refresh"/> <input type="button" value="All data"/> </div> <div>  </div> </div>
Sea temperature	<input checked="" type="checkbox"/> <input data-bbox="241 1270 266 1289" type="button" value="+"/>
Electrical conductivity	<input checked="" type="checkbox"/> <input data-bbox="241 1335 266 1353" type="button" value="+"/>
Dissolved oxygen	<input checked="" type="checkbox"/> <input data-bbox="241 1392 266 1410" type="button" value="+"/>



Bouée Smile Baie de Seine – Coast HF



Bouée MOLIT Baie de Vilaine



Coastal ocean observing system - High Frequency

« Réseau qui vise à **fédérer** et **coordonner** à l'échelle du **littoral français** un ensemble de **plateforme fixes** instrumentées de mesures *in situ* hautes fréquences pour des **paramètres clés** des eaux **côtières** »

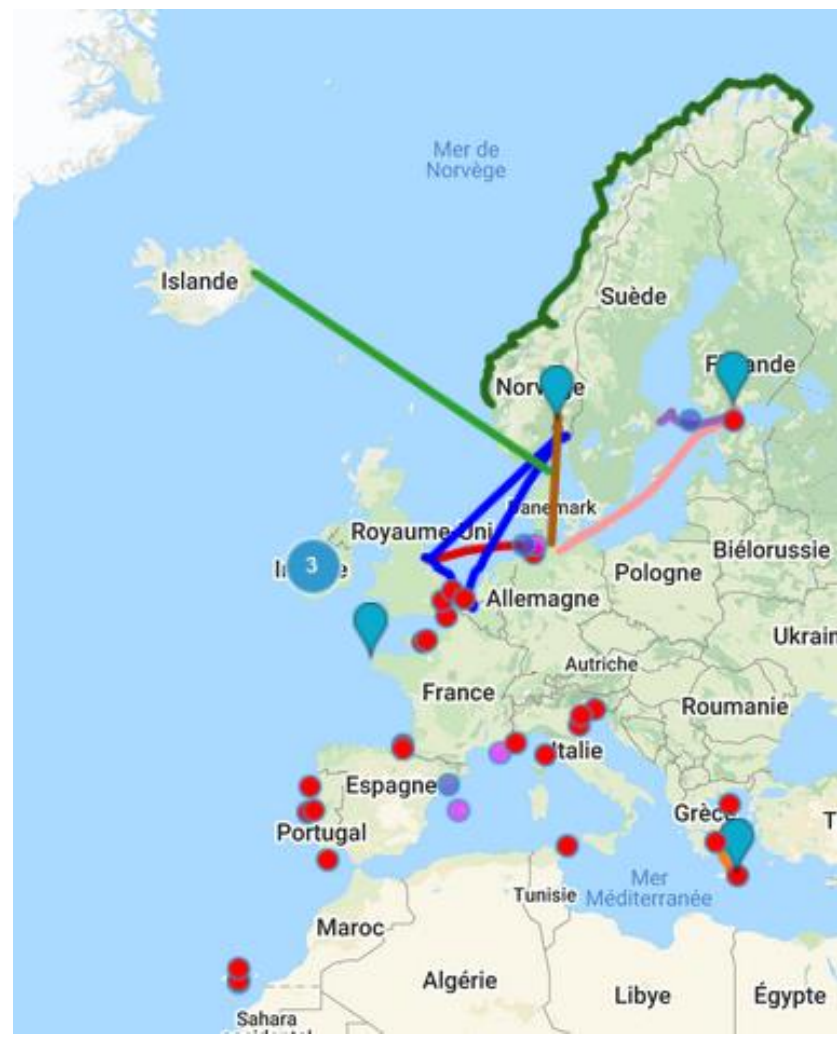
14 sites

Recommandations instrumentales

Température,	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Conductivité	$\pm 0,3 \text{ mS/cm}$
Fluorescence	$\pm 10\%$
Turbidité	$\pm 10\%$
Erreur Maximale Tolérée	

Fréquences d'échantillonnage
10-20 min pour Grandeurs physiques
1 jour pour les nutriments
30 minutes les grandeurs météo

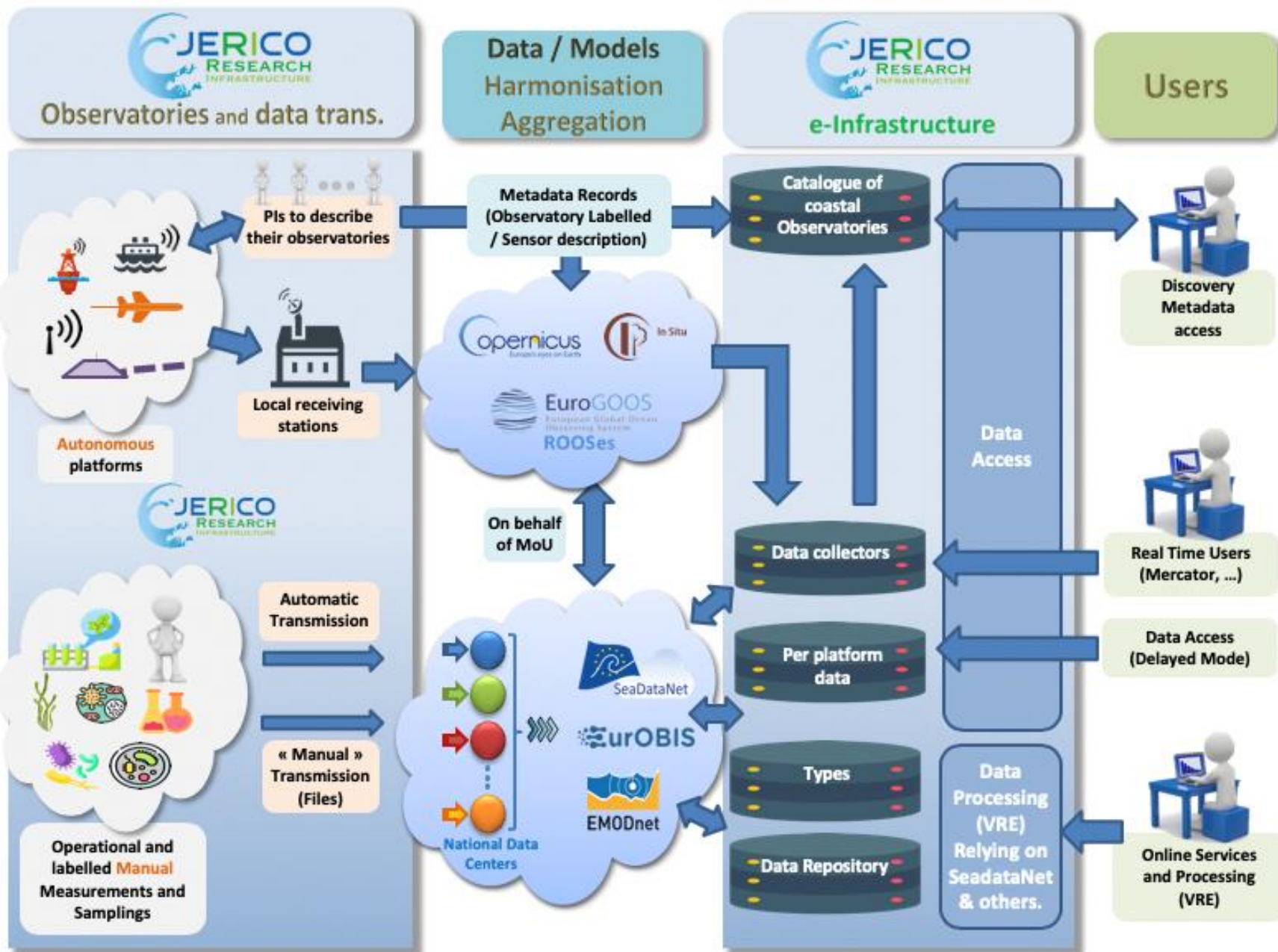
Profils verticaux automatisés
Autres paramètres peuvent compléter
Capacité évolutive des stations
Tests de nouveaux capteurs



Données marines de haute qualité

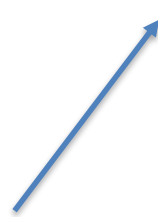
φ χ
bio géo

Standardisées
Durables
Inter-comparables
Gratuites



Spécificités instrumentales liées au Côtier

Surface & hauts fonds
+ proximité des côtes



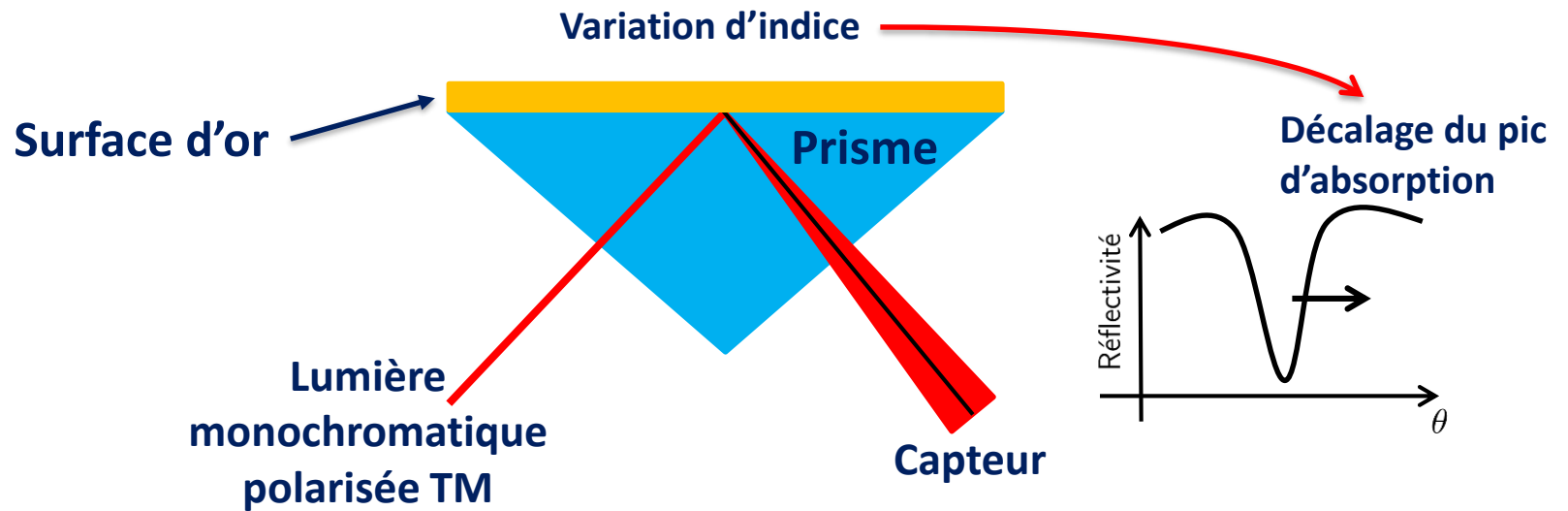
Enjeux

Etude du forçage anthropique (pollution, etc.)

Economie bleue (aquaculture)

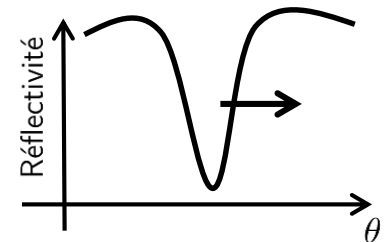
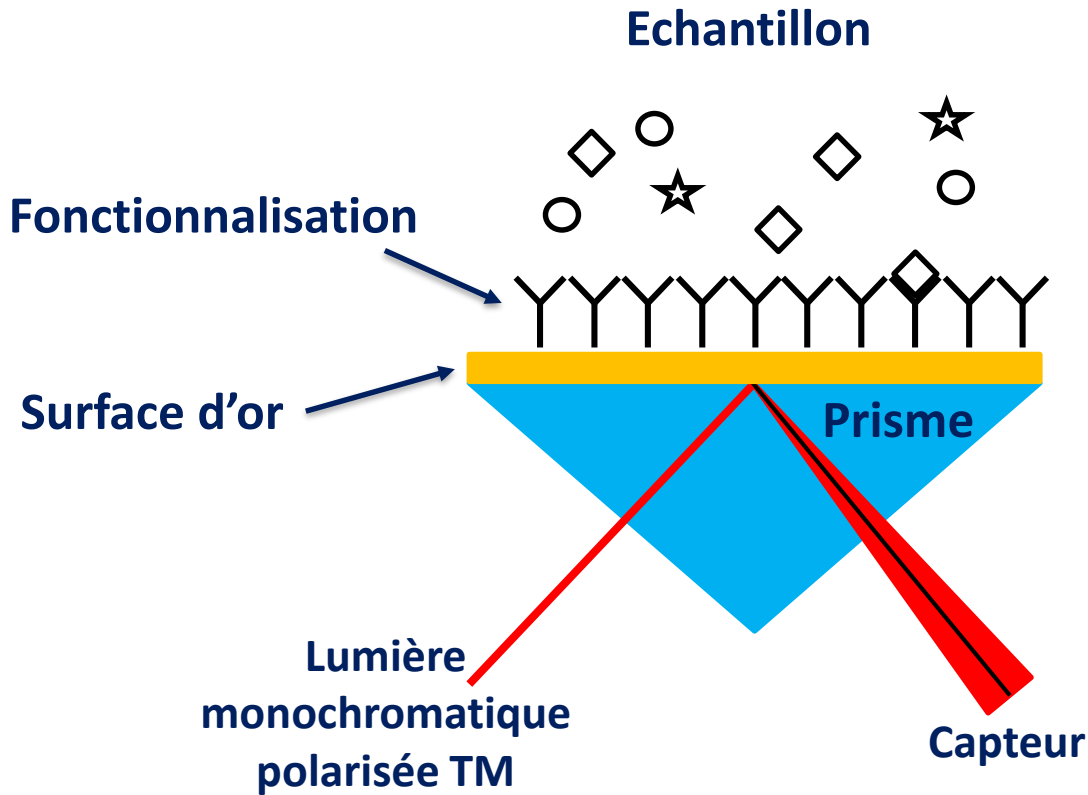
Grande **diversité** d'espèces/grandeurs à mesurer

Comment rendre un instrument « spécifique » à une espèce particulière?



Résonance plasmonique de surface

Comment rendre un instrument « spécifique » à une espèce particulière?



Résonance plasmonique de surface + Fonctionnalisation de surface

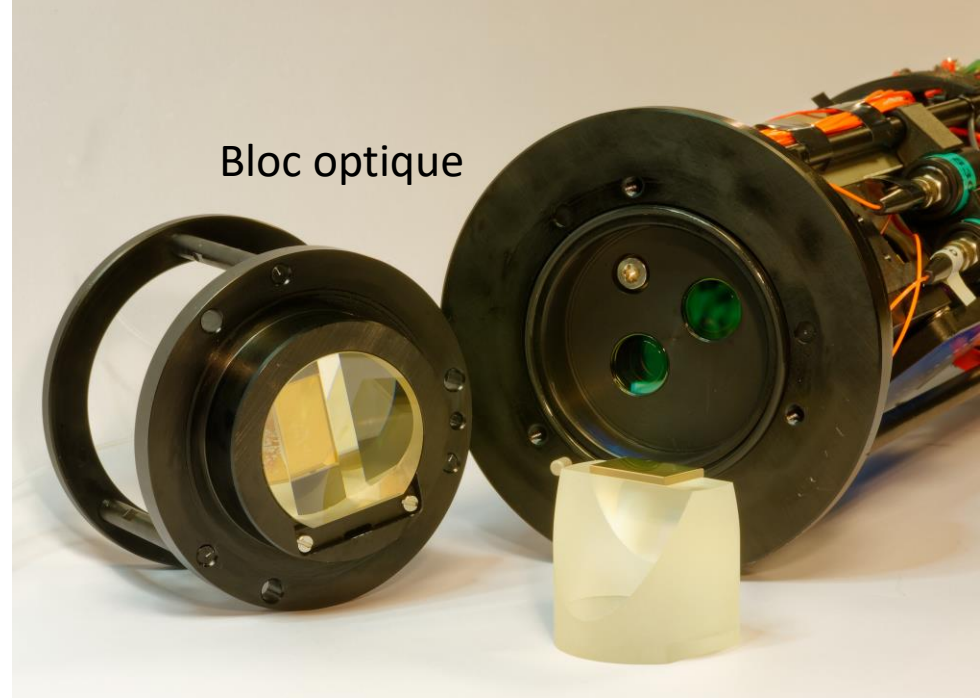
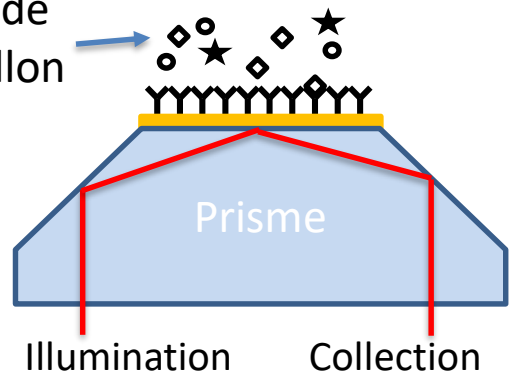
Mesure d'une phycotoxine

BIRMA – JERICO Colas et al.

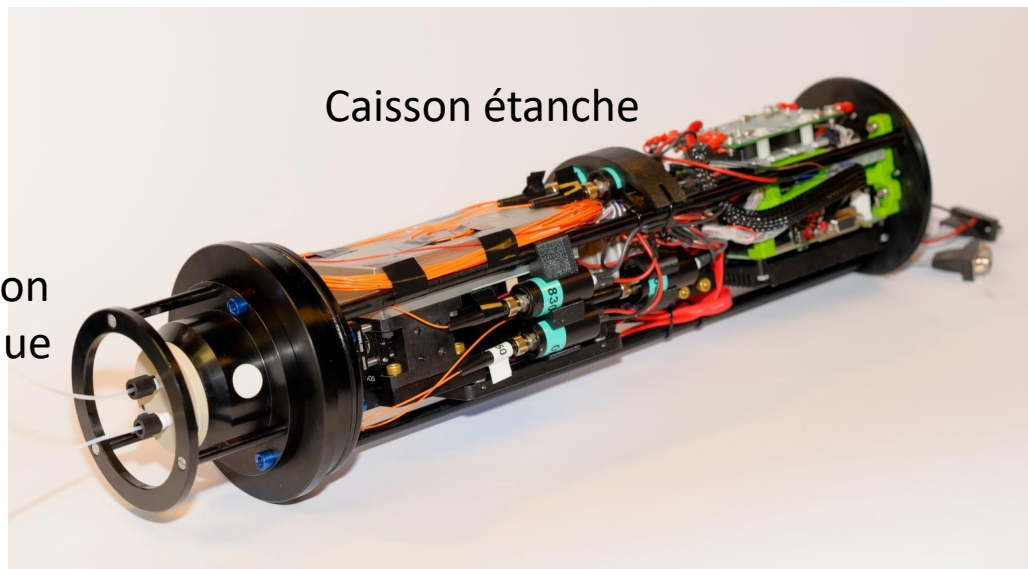
Acide domoïque

Sensibilité : 0,1 ppb

Injection de l'échantillon



Prisme +
Lame d'or



Injection
fluïdique

Spécificités des observatoires côtiers

**Surface & hauts fonds
+ proximité des côtes**

Enjeux

Etude du forçage anthropique (pollution, etc.)
Economie bleue (aquaculture)
Grande diversité d'espèces/grandeurs à mesurer

Relative **accessibilité** des bouées

Maintenance/étalonnage des instruments facilités
Alimentation électrique par câble ou PV

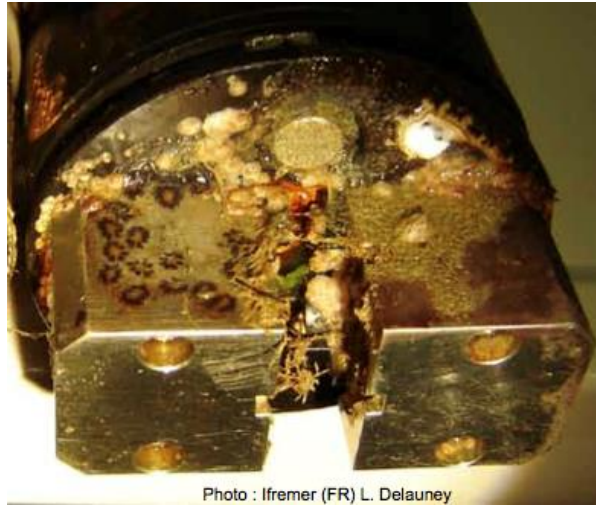
Extrême variabilité (saison, météo, localisation...)

Dynamique, répétabilité, etc.

Présence de vie !

Biosalissures sur les instruments

Biosalissures



Fluorimètre après 30 jours
d'été à Helgoland



Transmissiomètre après 40 jours
d'été au port de Thronnheim

Conséquences pour les instruments

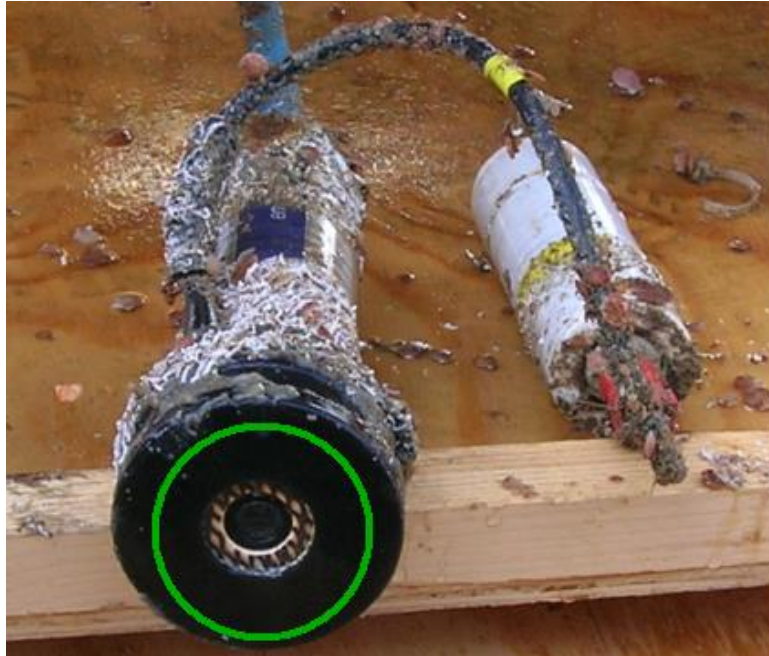
Diminution de sensibilité
Augmentation du temps de réponse
Dérives diverses

...

Flou
Perte de luminosité

...

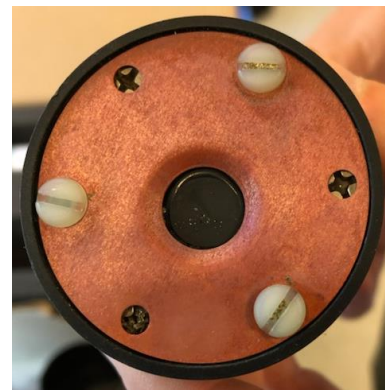
Electrolyse de l'eau salée -> Ions hypochlorites



Protection par **chloration** (javellisation) locale. 56 jours d'immersion dans la baie du mont Saint-Michel. L. Delauney et al. 2006 Ifremer

Autres approches :
Dépot de dioxyde d'étain sur les hublots.
Transparent & Conducteur !

Debiemme-Chouvy et al. 2011



Cuivre

Les réseaux d'observatoires

**Une grande disparité de milieux
& des contraintes instrumentales variées**

1. Côtier

2. Grands fonds

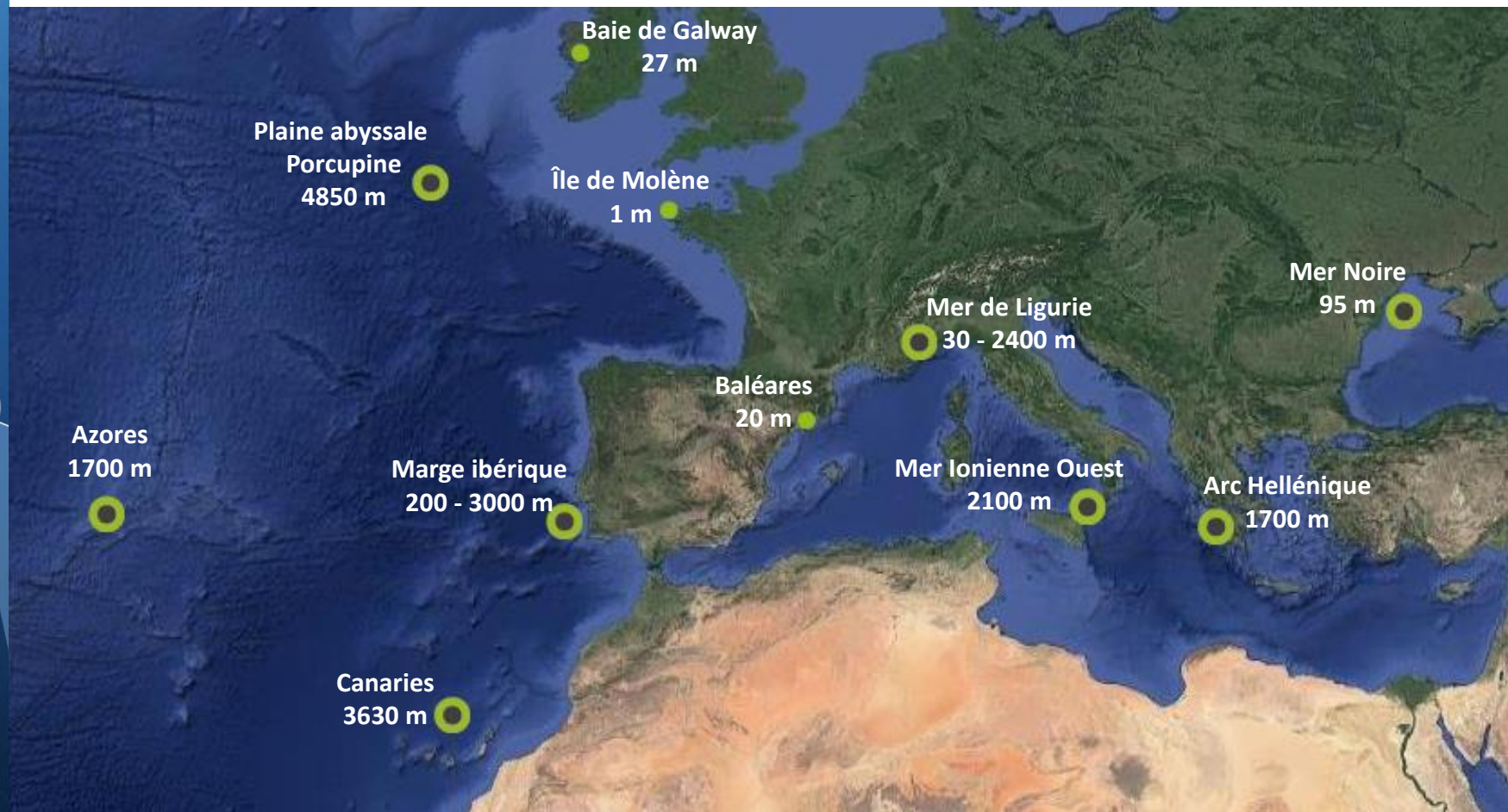
3. Hauturier

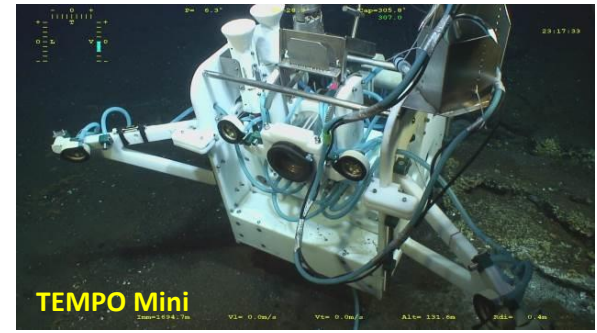
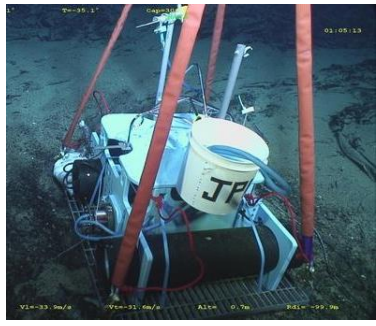
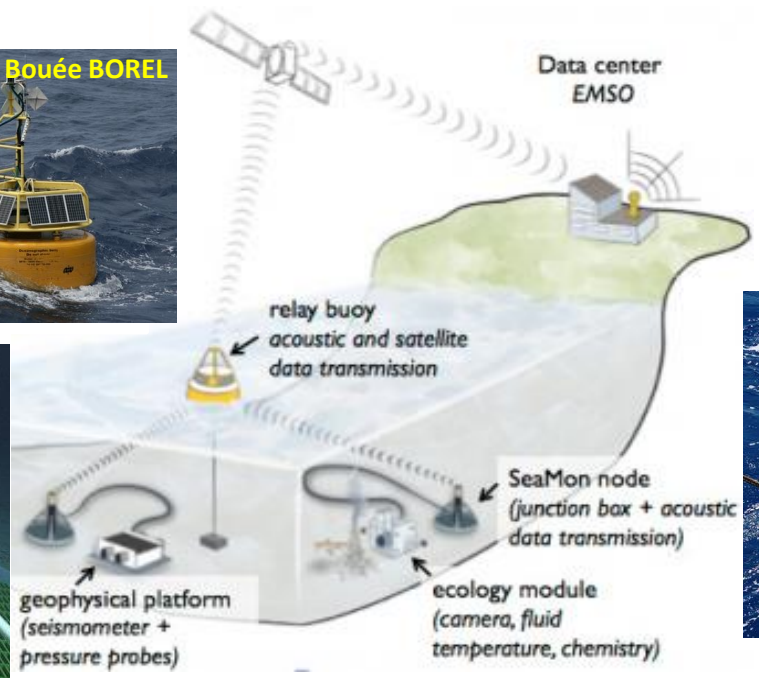
Observatoires fond de mer



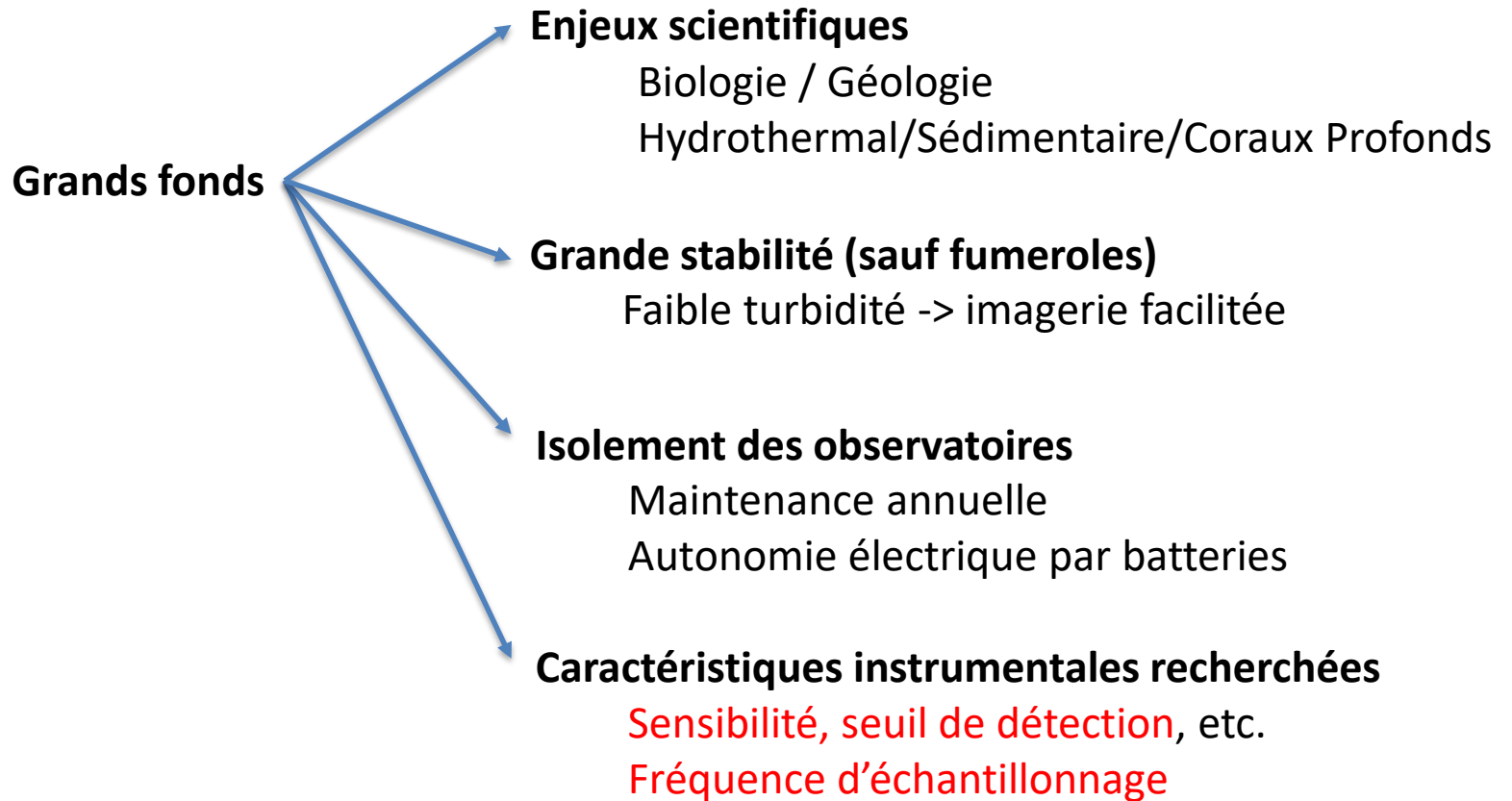
European Multidisciplinary Seafloor and Water Column Observatory

Impact du changement climatique sur les océans entourant l'Europe
 Ecosystèmes marins : Recherche fondamentale & Gestion durable
 Processus géologiques & risques associés



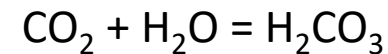


Spécificités des observatoires fond de mer



Mesure du pH_{total}

Emissions de CO₂ → **Acidification** des océans
Préindustriel 8.21, en baisse régulière



Acide carbonique

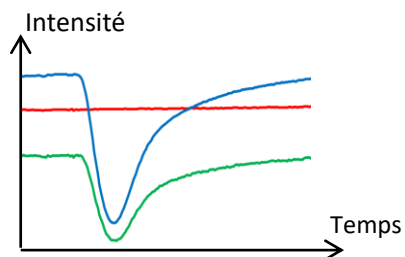
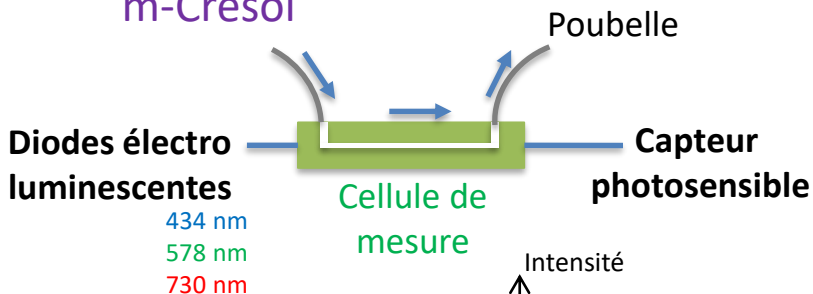
Guide to Best Practices for Ocean CO₂ Measurements

PICES SPECIAL PUBLICATION 3
IOCCP REPORT No. 8

Méthode de référence :
Standard Operating Procedures 6b (Dickson 2007)

Flow Injection Analysis + spectrophotométrie

Eau de mer +
m-Crésol



The pH_T of sea water is given by the following equation:

$$\text{pH}_T = -\log_{10} K_2 \left[\frac{\varepsilon_1(\text{Ind}^{2-})}{\varepsilon_2(\text{HInd}^-)} \right] + \log_{10} \left[\frac{\frac{A_{578} \cdot \varepsilon_1(\text{HInd}^-)}{A_{434} \cdot \varepsilon_2(\text{HInd}^-)}}{1 - \frac{A_{578} \varepsilon_2(\text{Ind}^{2-})}{A_{434} \varepsilon_1(\text{Ind}^{2-})}} \right]$$

With: $-\log_{10} K_2 \left[\frac{\varepsilon_1(\text{Ind}^{2-})}{\varepsilon_2(\text{HInd}^-)} \right] = a + \frac{b}{T} + c \ln T - dT$

T = corrected temperature in Kelvin

Where: $a = -246.64209 + 0.315971 S + 2.8855 \times 10^{-4} S^2$
 $b = 7229.23864 - 7.098137 S - 0.057034 S^2$
 $c = 44.493382 - 0.052711 S$
 $d = 0.078134$

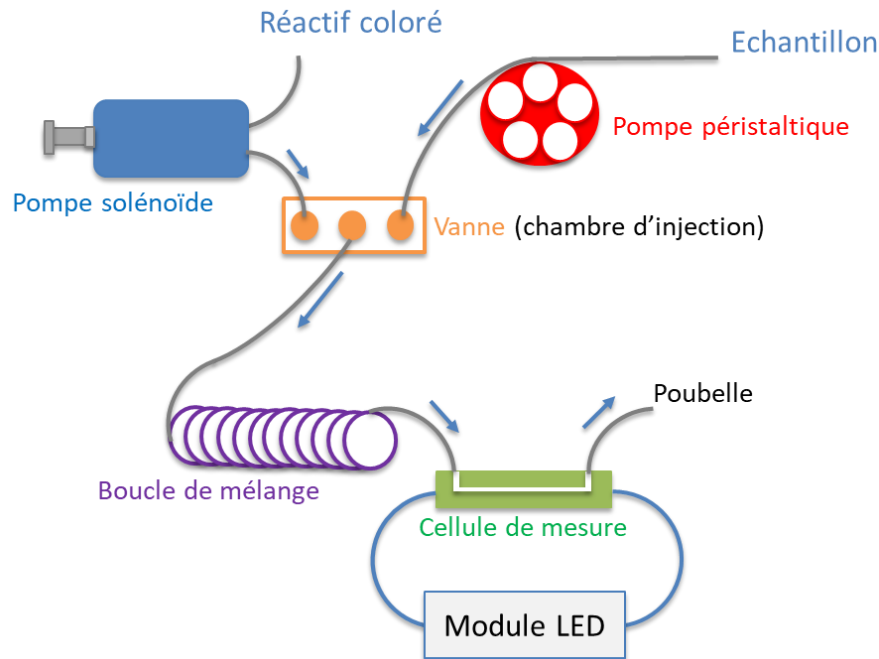
$$\frac{\varepsilon_1(\text{HInd}^-)}{\varepsilon_2(\text{HInd}^-)} = -0.007762 + 4.5174 \times 10^{-5} \times T$$

$$\frac{\varepsilon_2(\text{Ind}^{2-})}{\varepsilon_1(\text{Ind}^{2-})} = -0.020813 + 2.60262 \times 10^{-4} \times T + 1.0436 \times 10^{-4} \times (S - 35)$$

Instrument Chemini pH

Ifremer A. Laes, R. Davy

CHEmical MINIaturized analyser – in situ flow analyser



Mesure sensible à la température : sonde locale nécessaire
Autocalibration *in situ* grâce à l'embarquement de solutions tampons

Méthode très générale : Ions Fer, Manganèse, Nitrites...

Indicateur coloré, longueurs d'onde...

CHEMINI deep sea version

Indicateur coloré :
Ferrozine

Parameters	Iron Fe	Sulfur H ₂ S	Manganese Mn
Accuracy	5% (6 μmol.l ⁻¹)	3.5% (10 μmol.l ⁻¹)	2% (6 nmol.l ⁻¹)
Sensitivity	0.3 μmol.l ⁻¹	0.33 μmol.l ⁻¹	0.12 nmol.l ⁻¹ (5 min pre-concentration)
Wavelength	Colorimetry		
Measure	570 nm	630 nm	620 nm
Reference	810 nm	810 nm	810 nm
Sample rate	4 min	4 min	8 min
Depth rating	0 m - 6000 m		
Output	RS 232		
Software	IHM Chemini		
Power supply	24 volt DC		
Weight (in air)	In air 3.5 kg ; in sea water 6.5 kg		
Dimensions	240 x 125 x 220 mm + 264 x Ø140 mm		
Sensor type	Wet chemistry		

Long-Term *In Situ* Survey of Reactive Iron Concentrations at the EMSO-Azores Observatory

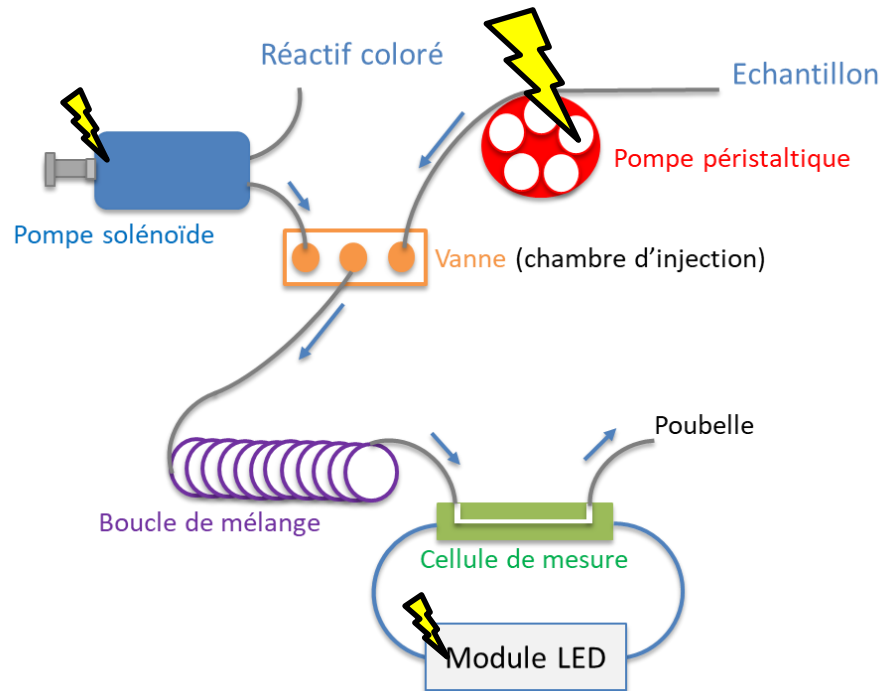
Agathe Laës-Huon, Cécile Cathalot, Julien Legrand, Virginie Tanguy, and Pierre-Marie Sarradin

6 mois d'enregistrement → ([Fe] = 7.12 ± 2.11 μmol.L⁻¹, *n* = 519)

Améliorer la fréquence d'échantillonnage

Paramètres limitants :

Electricité ⚡
 Consommables
 → Réactifs



Solution : Passage de la **milli-** à la **micro-fluidique**

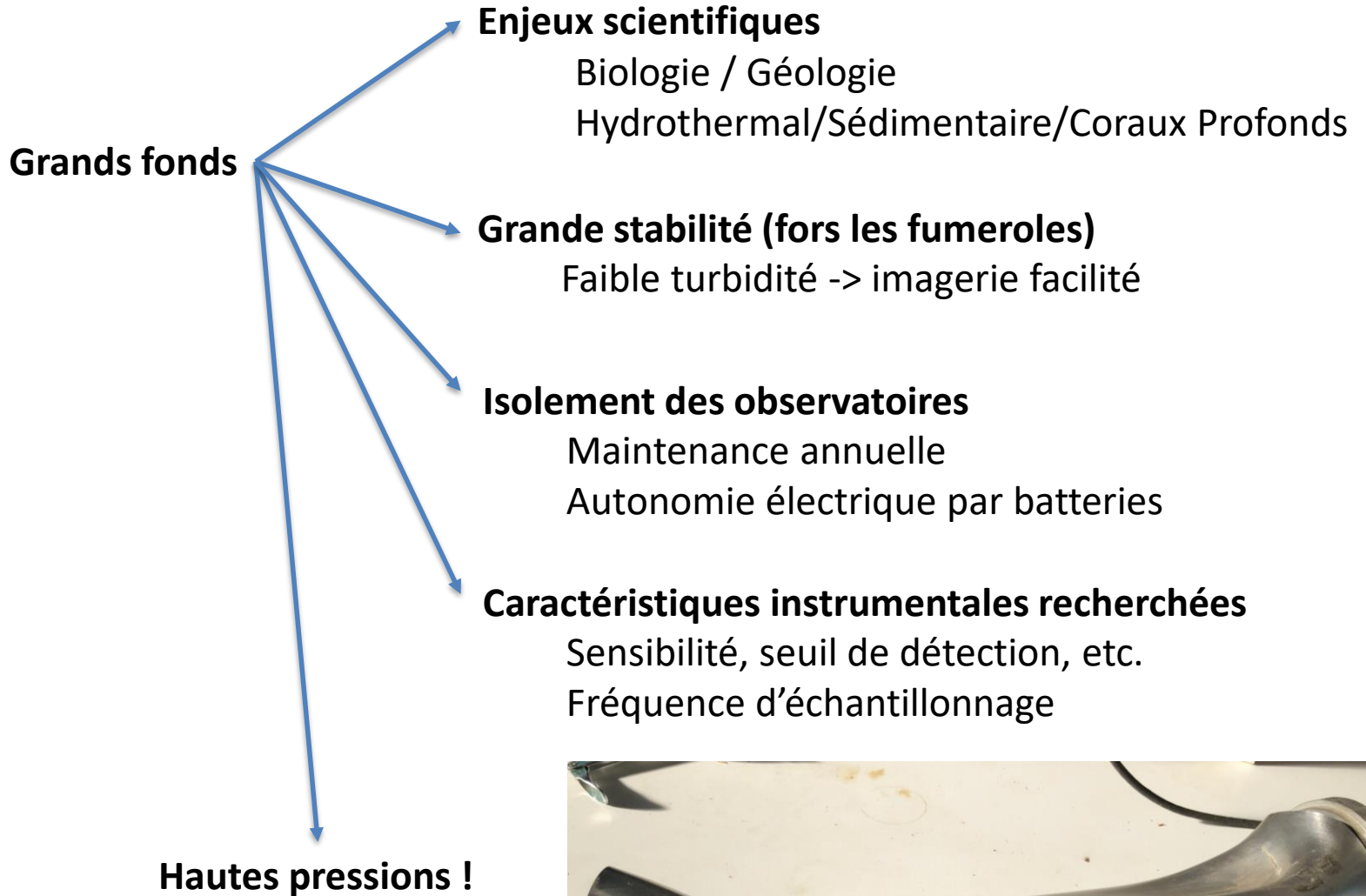
Verrou technique :
Injection, guidage & collection
 de la lumière dans une cellule
 de mesure μ fluidique

Déterminants pour
 la **sensibilité & le seuil de détection**

Approche étudiée actuellement à l'Ifremer :
Guide optofluidique

Fibre Optique à cœur liquide

Spécificités des observatoires fond de mer



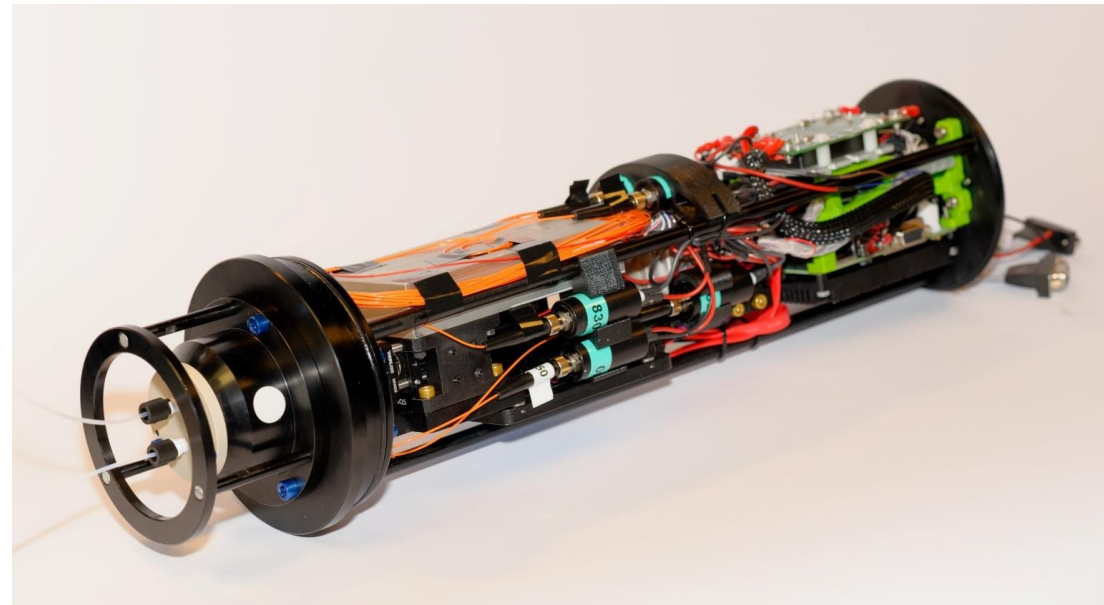
**Cylindre implosé
~ 6000 m**

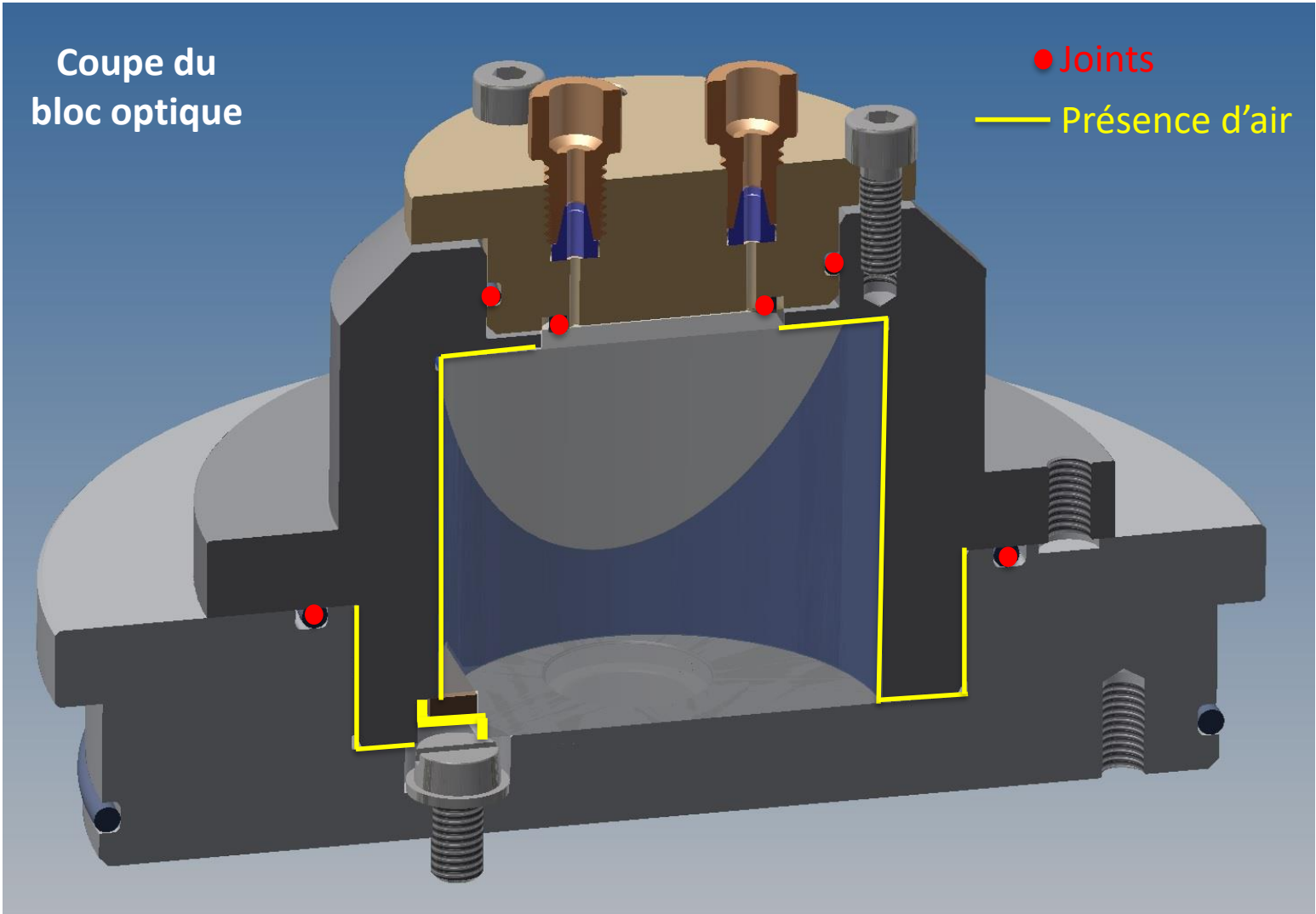


Mesure simultanée de
4 ions métalliques


0 – 6000 mètres

Point de départ
pour l'**optomécanique** :
Instrument BIRMA





Incompatible avec les hautes pressions...

Optique équipression  Remplissage d'huile à immersion
Protocole de dégazage

Les réseaux d'observatoires

Une grande disparité de milieux
& des contraintes instrumentales variées

1. Côtier
2. Grands fonds
- 3. Hauturier**

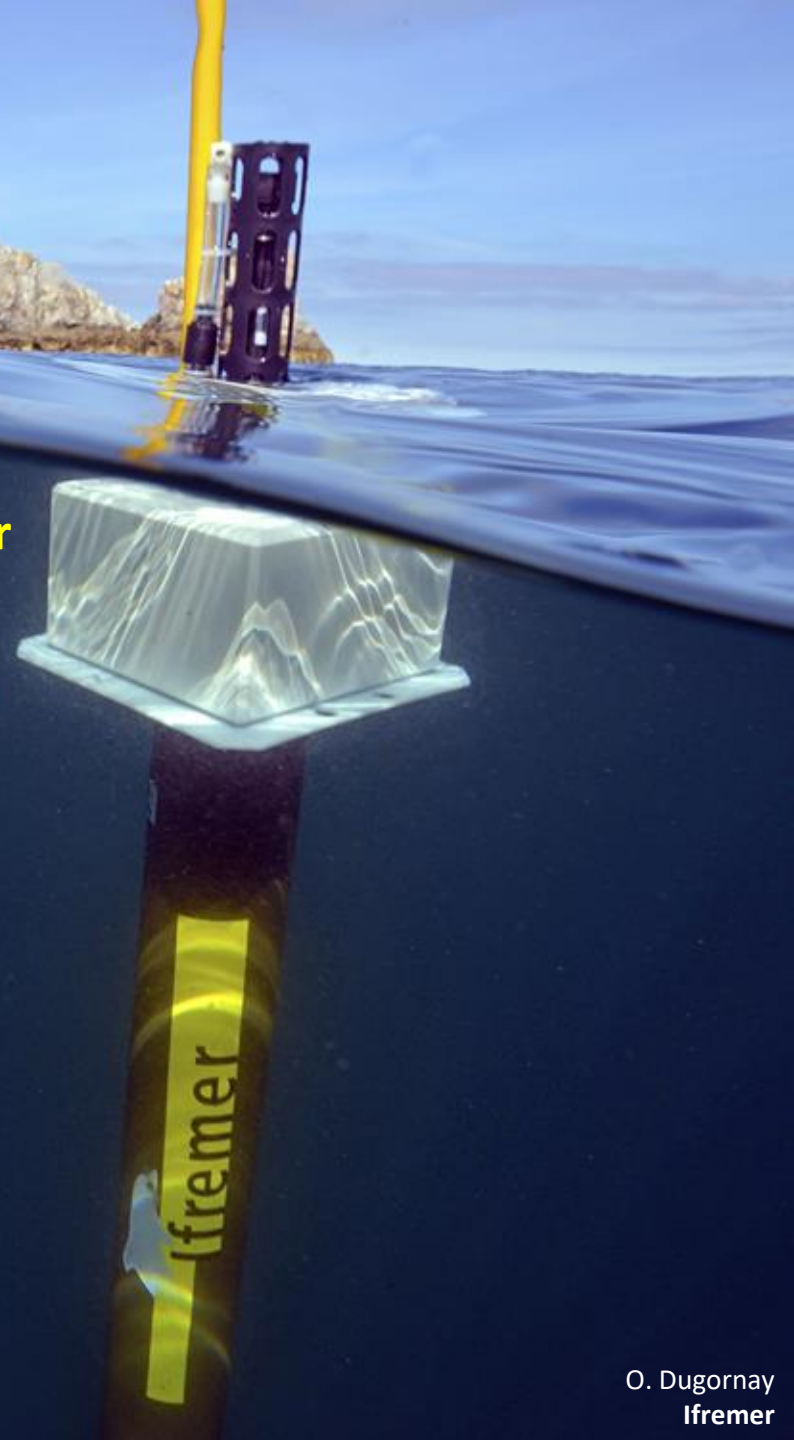
Milieu hauturier

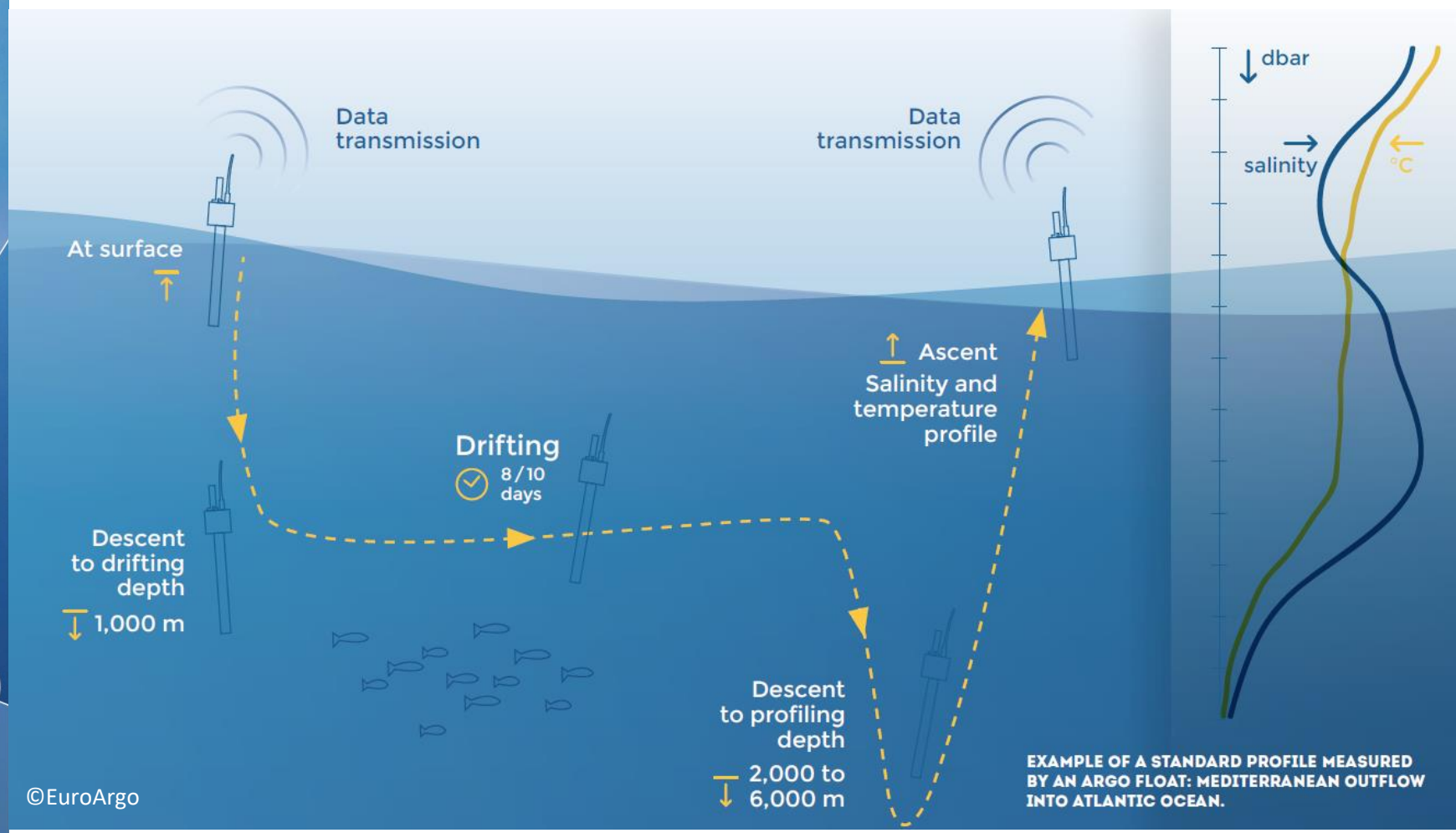
« Océan intérieur »

Profileur Arvor



Déploiement d'un
profileur Arvor depuis
le Pourquoi pas?





Masse constante mais **volume réglable** -> Variation de Flottabilité
Ballast



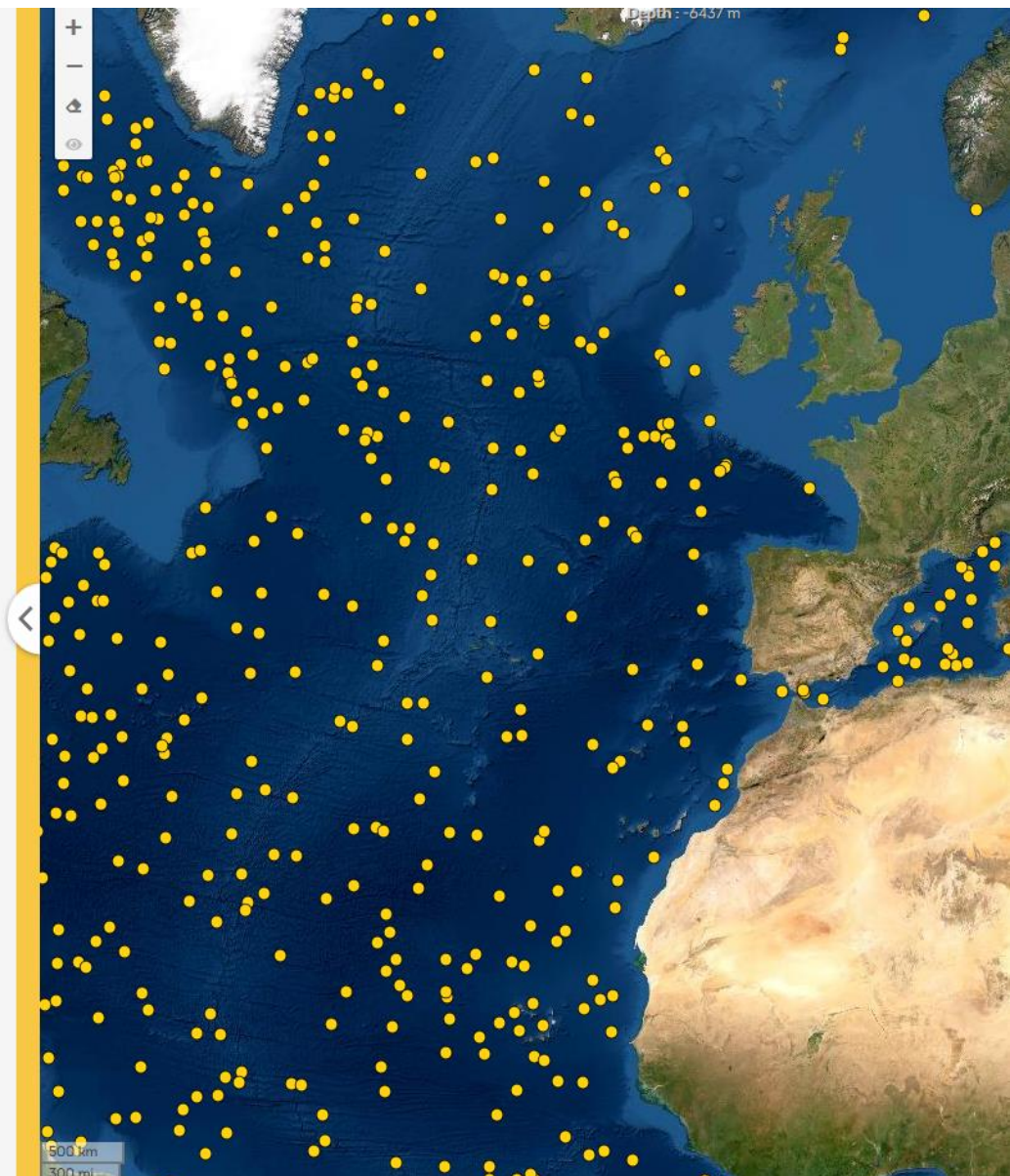
11 pays européens
« Observation globale » pour la météo & le climat

4000 flotteurs
35000 profils par an

3765 floats



A	WMO	Float S/N PTT	Float	Last Tx	Last cycle	Battery	L
		AI2632-17EU023 596821	ARVOR	28/10/2020 05:57:30	191	■ 10	2
		17101 41227	ARVOR	26/10/2020 06:03:00	104	■	2
		2920 67057	APEX	26/10/2020 02:37:40	476	■	2
		2890 67039	APEX	28/10/2020 01:22:39	482	■	2
		4633 95247	APEX	26/10/2020 10:16:38	346	■	1
		AI2600-16FR063 360722i	ARVOR	27/10/2020 08:48:20	138	■ 9.2	2
		0787 n/a	NAVIS_A	23/10/2020 12:20:21	118	■	1
		0411 411658	NOVA	29/10/2020 04:53:06	138	■	2
		0415 0415	NAVIS_A	24/10/2020 01:40:57	135	■	2
		8496 n/a	SOLO_II	25/10/2020 18:57:01	146	■	2
		7267 n/a	APEX	20/10/2020 18:15:24	143	■	2



About Float

WMO
6902840

Platform maker
NKE

Inst reference
AL2500-17FR011

Platform type
ARVOR

Transmission system
ARGOS

PTT
33984

Owner
SHOM

Data Centre
CORIOLIS

Sensors
CTD_PRES, CTD_TEMP, CTD_CNDC

Deployment

Launched A year ago
29/10/2019 10:10:00

Deployment Latitude
46.5718

Deployment Longitude
-9.67

Ship
4MYPLANET

Cruise
JACQUES VABRE 2019

Project
CORIOLIS

Principal Investigator
Christine
COATANOAN

Cycle activity

Status
Active

Age
0.99 years old

Last station date
25/10/2020 16:22:00

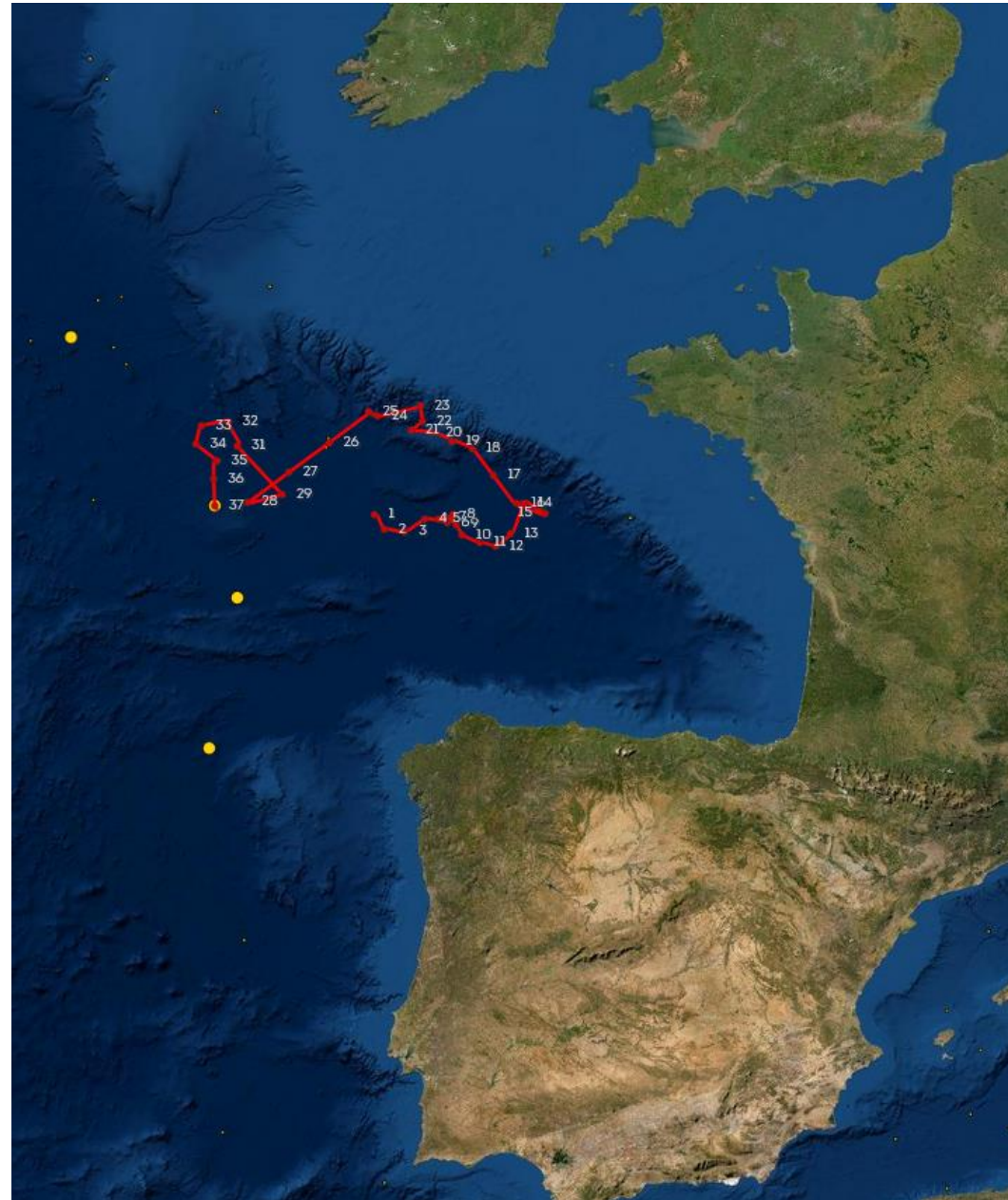
Cycle
37

Last Surface Data
106 dbar 12.357°C 35.582 PSU

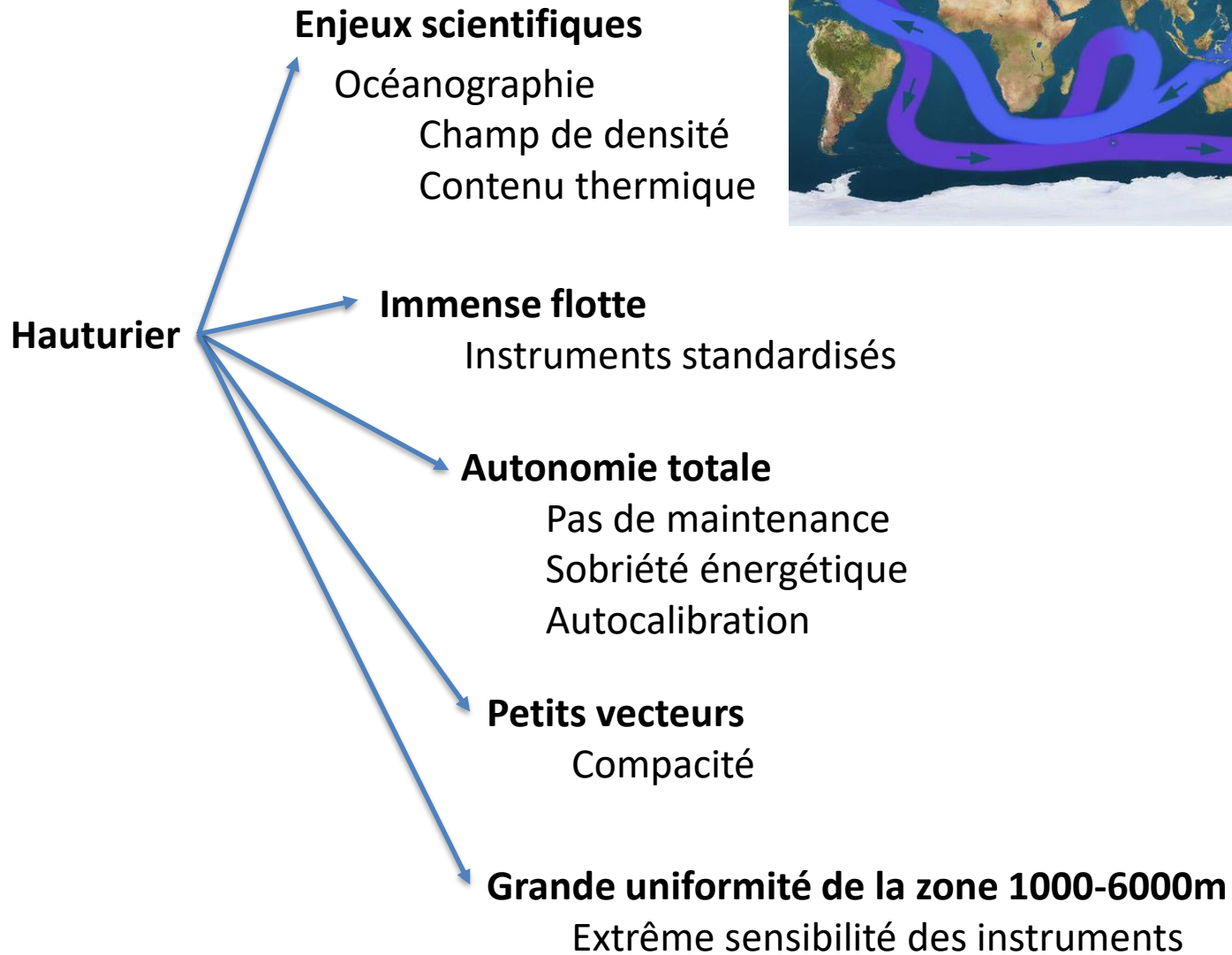
Last Bottom Data
1963 dbar 3.706°C 34.956 PSU

Stations data
[in Ascii](#) [in Netcdf](#)

Trajectory data
[in Ascii](#) [in Netcdf](#)



Spécificités des profileurs



Densité, salinité et indice optique

Calcul de la densité lié à un modèle physique

Equation d'état
Densité = f(**S**, T, P)

« Concentration du matériel dissous dans 1 kg d'eau de mer »

Partie ionique

99%

Partie non-ionique

1%

Equation Of Seawater - EOS80

Mesure conductimétrique
+ corrections semi-empiriques

Evolution des recommandations de l'IOC

Thermodynamic Equation Of Seawater- TEOS10

Densité ↔ Indice optique
 $n(\mathbf{S}, T, P, \lambda)$

Un exemple de salinomètre optique

Advances in measuring ocean salinity with an optical sensor

M Le Menn¹, J L de Bougrenet de la Tocnaye², P Grosso², L Delauney³, C Podeur³, P Brault⁴ and O Guillerme⁴

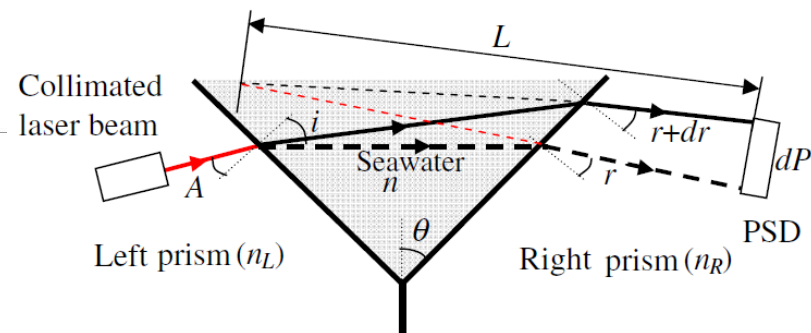


Figure 1. Schematic diagram of TPR.



Capteur
NOSS
par NKE

DESIGNATION		NOSS
Refractive Index	Range	1.3353 to 1.3458
	Initial accuracy	$< 1.10^{-6}$
Absolute Salinity (According to TEOS-10) (Seaver&Millard 1990)	Range	15 to 42 g/kg
	Initial accuracy	± 0.005 g/kg
Density	Range	1020 to 1030 kg/m ³
	Initial accuracy	± 0.003 kg/m ³

On voudrait hélas 20x plus précis...
0.0002 g/kg

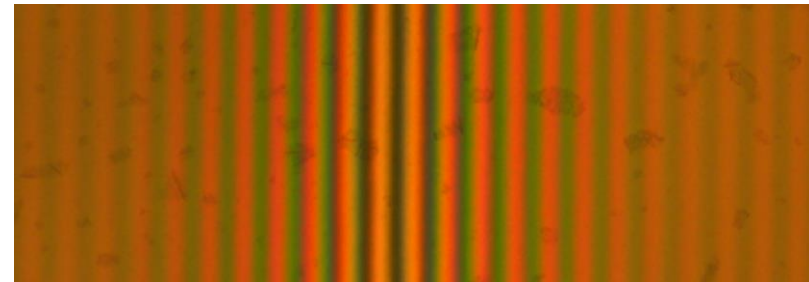
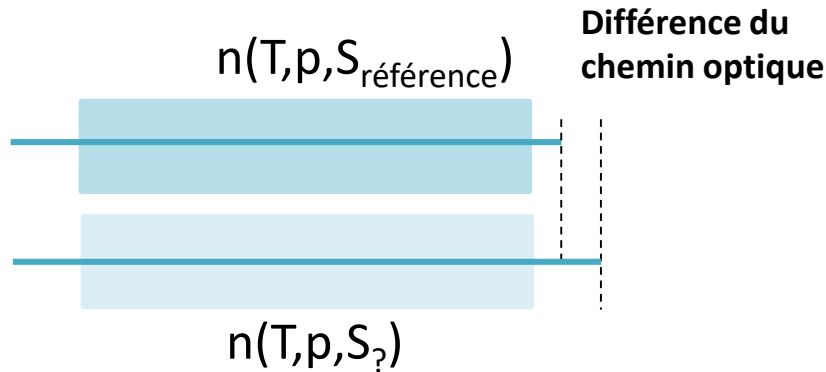
Cahier des charges

	n
Dynamique	1.35 - 1.45
Sensibilité	5.10⁻⁸

+ Contraintes liées aux profileurs

- Sobriété énergétique
- Compacité
- Autocalibration
- 0 - 4000 m
- ...

Une approche interférométrique



- Interféromètre de Michelson Marinisé
- Configuration Coin d'air
- Source polychromatique

} **Déplacement de franges avec S**

Levée de dégénérescence

D'autres grandeurs mesurées grâce à l'optique

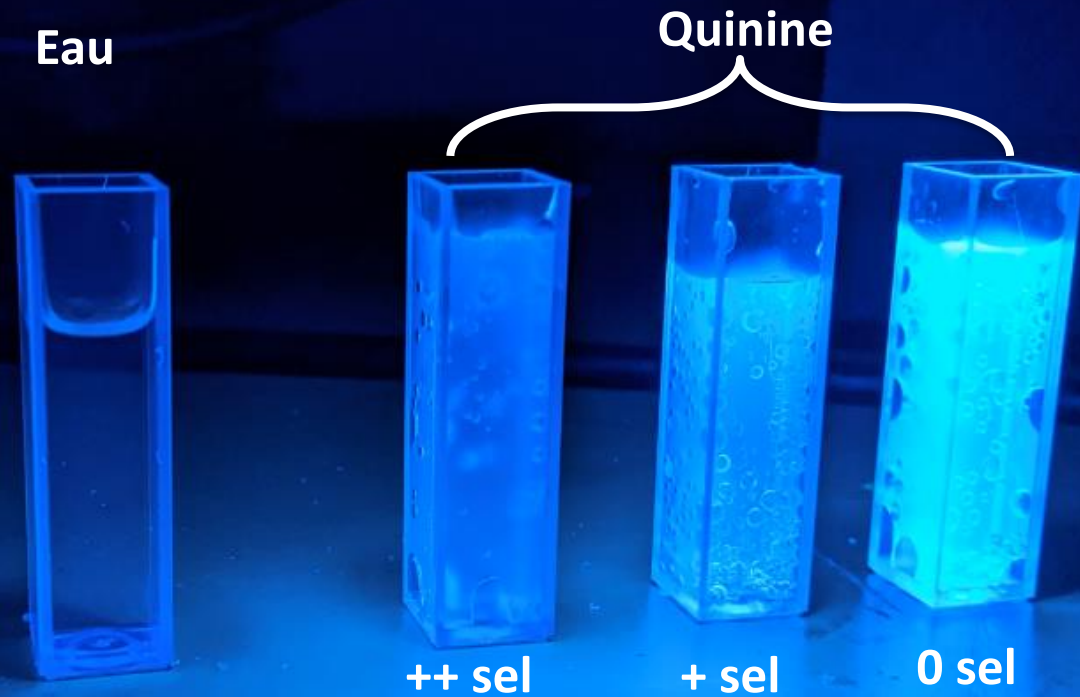


Extrait du « *Science & Implementation Plan* »

3.1 Biogeochemical Sensors.....	17
3.1.1 Oxygen	18
3.1.2 Nitrate	19
3.1.3 pH	20
3.1.4 Chlorophyll fluorescence	20
3.1.5 Suspended particles	20
3.1.6 Downwelling irradiance	21

Une petite expérience illustrative

Eclairage à la lampe UV



Les ions Chlorures Cl⁻ désactivent la fluorescence de la Quinine.

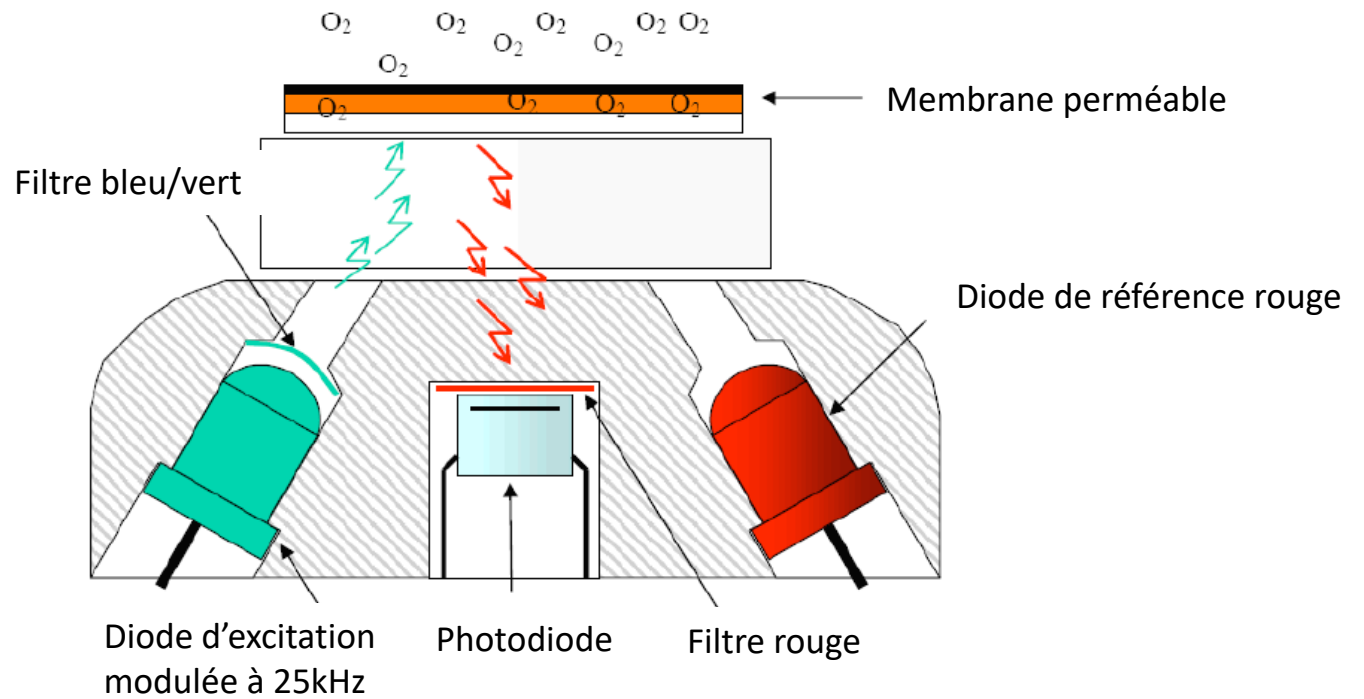
Fluorescence Quenching

O₂ dissous

Complexe Platine-Porphyrine

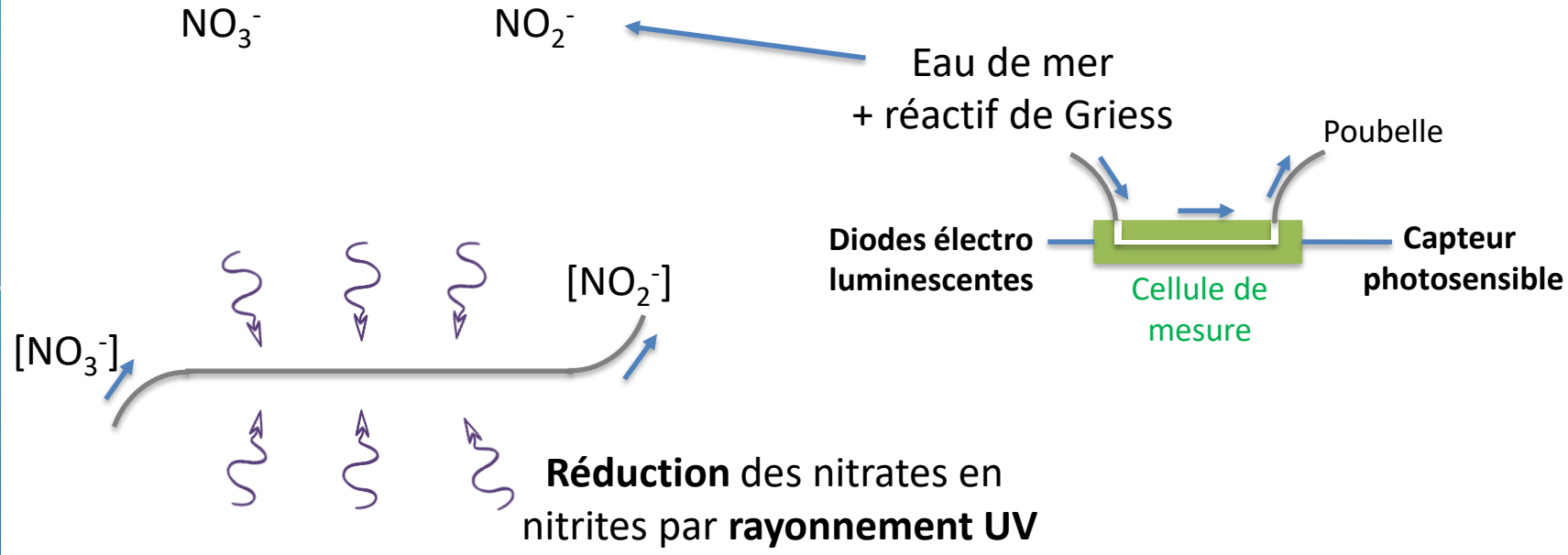
Quenching de la fluorescence d'un **fluorophore** enchâssé dans une membrane perméable au dioxygène.

Concentration O₂ ↔ Durée de vie de l'état excité



Mesure = calcul du **déphasage** entre référence & émission

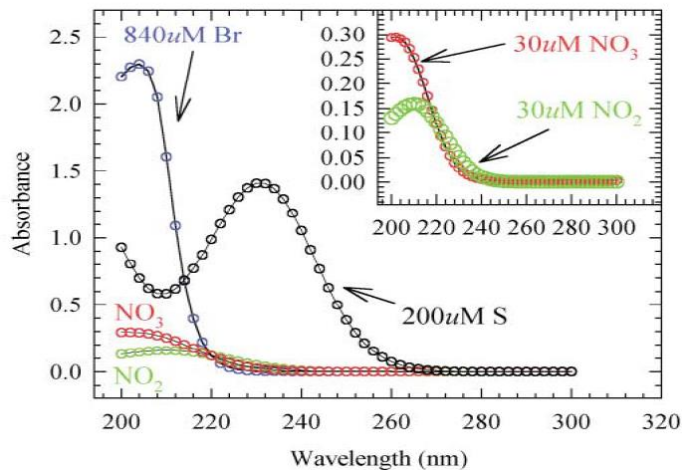
Nitrates & Nitrites



Autre approche :
Spectrophotométrie UV

Détection < 1 μmol

Batterie Lithium 30 Ah
1 mesure/ heure pendant 1 an



Development of an In Situ Ultraviolet Spectrophotometer (ISUS) for nitrate Determination. L. J. Coletti et al.

Chlorophylle

Indicateur de la **production primaire** & de la population de **phytoplancton**

Pigments photosynthétiques des micro-algues → **Chlorophylle A, B et C.**

Molécules fluorescentes

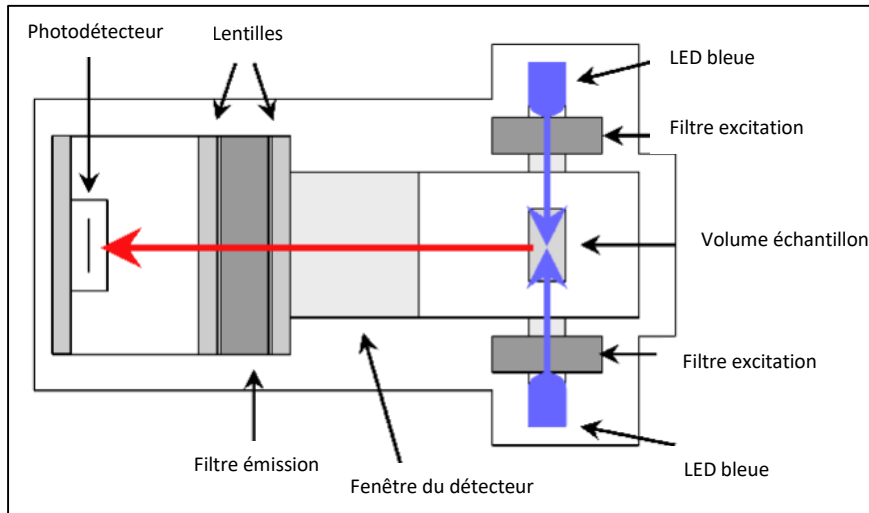
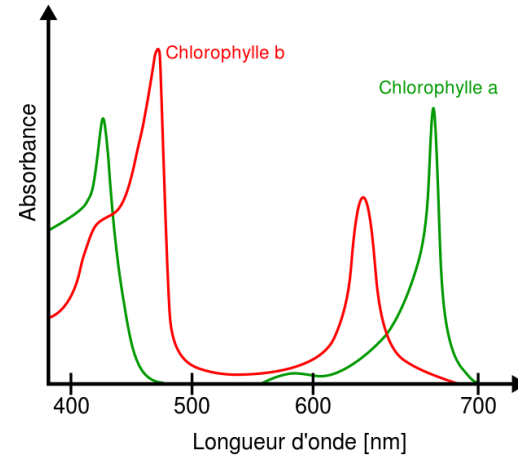


Schéma de principe d'un fluorimètre Chl

L. Delauney Ifremer



Fluorimètre
Sea Point

Notion de *Proxy*

La mesure effectuée par le fluorimètre ne renseigne pas directement sur la concentration en Chlorophylle.

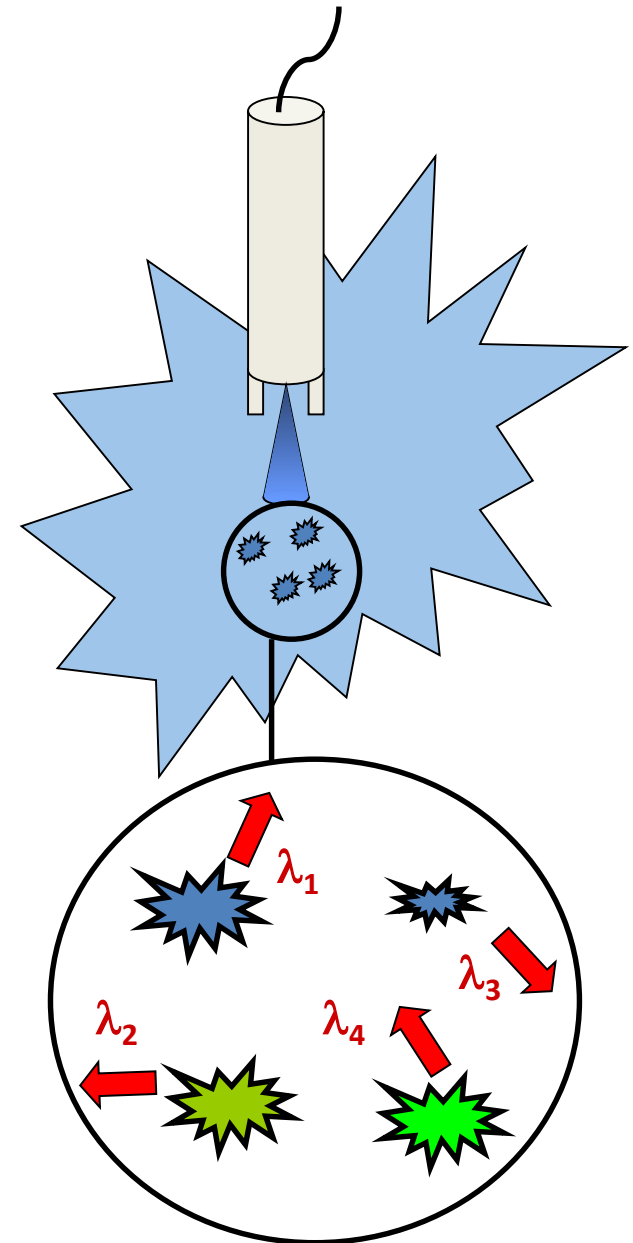
La **fluorescence du phytoplancton** est **variable** : espèce, maturité, état, éclaircissement, angle d'observation, ...

+ **Éléments fluorescents différents** :
Isotropie de diffusion de la fluorescence, λ de fluorescence

Fluorescence



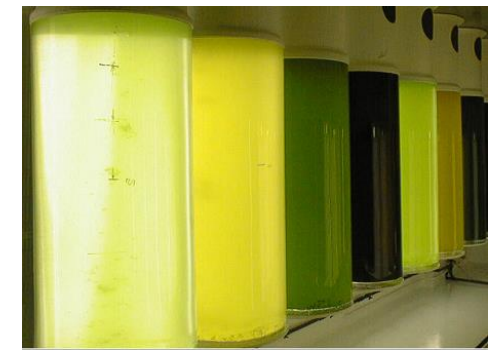
« **Proxy** » de la **Chlorophylle**



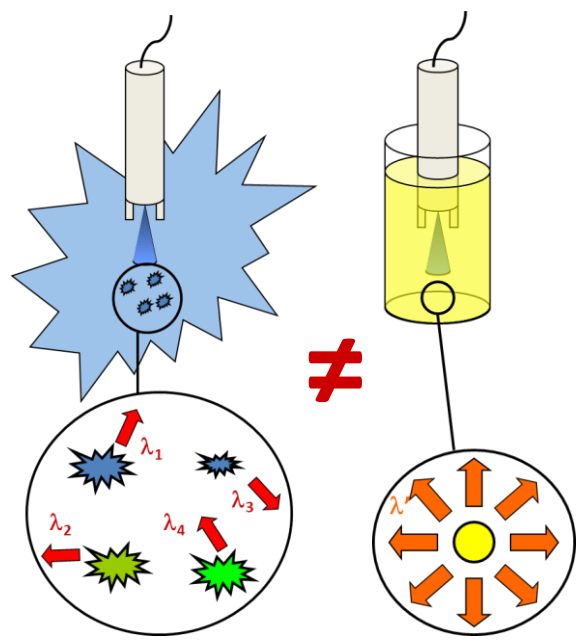
Le défi de l'étalonnage

Quel substance pour étalonner les fluorimètres ?

- 1) Algues en suspension ? →
- 2) Chlorophylle-a pure dans l'acétone ?
- 3) Fluorescéine ! ↙



Protocole métrologique actuel pour la Chl-a



L'étalonnage permet de déterminer la **dérive du capteur** ou une perte de linéarité mais pas la fonction de transfert [Chl-a] = f(fluorescence).

Particules en suspension : turbidimétrie

Baie de Concarneau – été 2020



- « Proxy »
- Dynamique & production du phytoplancton
 - Production primaire
 - Processus hydro-sédimentaires

Méthode :

Backscattering measurements



Etalonnage par Formazine

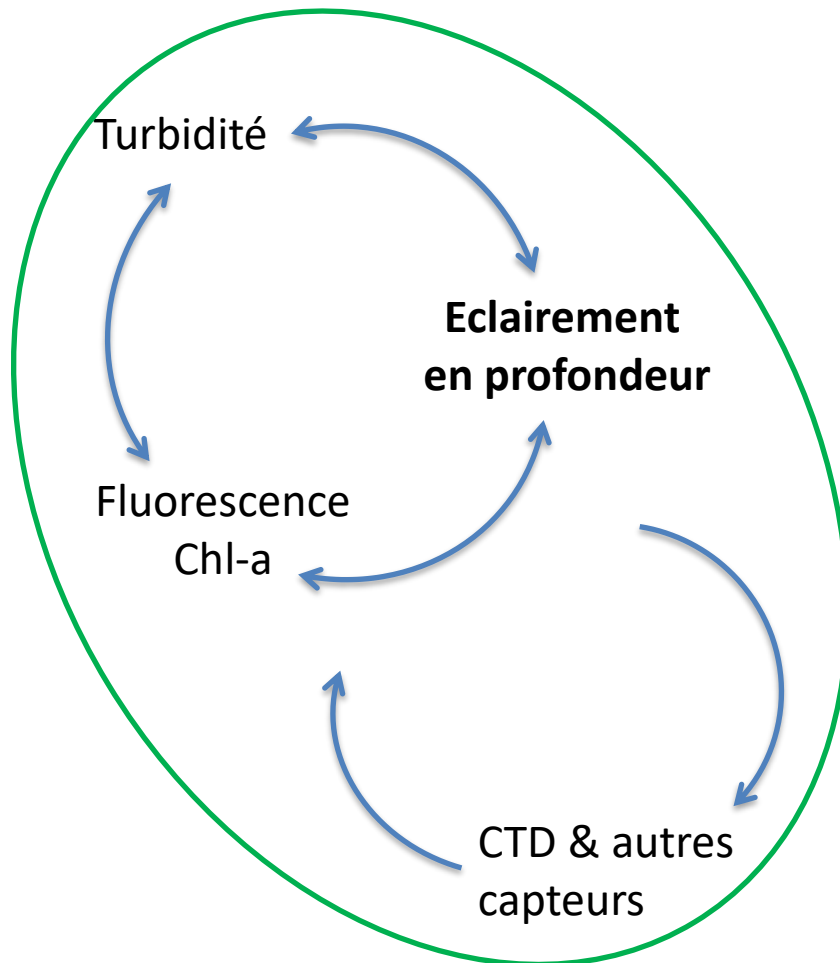
unité : FTU

norme NF EN ISO 7027

Downwelling irradiance – éclairage en profondeur

Lumière ambiante à quelques longueurs d'onde pertinentes

Radiomètres



Inter-comparaison des mesures

→ Perturbations extérieures

→ Dérives des instruments...

Corrections pour meilleures estimations

Conclusion

Surveillance de l'Océan cruciale

Climat
Biodiversité
Economie

Des réseaux en plein développement

Côtier
Grands Fonds
Hauturier

Données de qualité accessibles au plus grand nombre

Développements de capteurs
Protocoles métrologiques d'étalonnage, de validation
Mise en forme de plateforme de distribution

Optique omniprésente

Paramètres biogéochimiques
Contraintes instrumentales variées



Fréquence d'échantillonnage

Sensibilité
Spécificité
Sobriété/Compacité

Appliquer la Métrologie à l'observation de la Biodiversité

Essential Biodiversity Variables - EBVs

-> Systèmes **d'imagerie**

-> **Traitement & Analyses** d'images

Contraintes « inhabituelles »
Capteur non-impactant

PHYSICS	BIOGEOCHEMISTRY	BIOLOGY AND ECOSYSTEMS
Sea state	Oxygen	Phytoplankton biomass and diversity
Ocean surface stress	Nutrients	Zooplankton biomass and diversity
Sea ice	Inorganic carbon	Fish abundance and distribution
Sea surface height	Transient tracers	Marine turtles, birds, mammals abundance and distribution
Sea surface temperature	Particulate matter	Hard coral cover and composition
Subsurface temperature	Nitrous oxide	Seagrass cover and composition
Surface currents	Stable carbon isotopes	Macroalgal canopy cover and composition
Subsurface currents	Dissolved organic carbon	Mangrove cover and composition
Sea surface salinity		Microbe biomass and diversity (*emerging)
Subsurface salinity		Invertebrate abundance and distribution (*emerging)
Ocean surface heat flux		