

Les océans face au réchauffement climatique et aux activités humaines

Thibaut Wagener (Thibaut.wagener@univ-amu.fr)



Plan

1 : Océans et océanographie

2 : Impact des perturbations anthropiques sur les océans

3 : Une révolution dans les techniques d'observation des océans

1 : Océans et océanographie

Les Océans

Quelques chiffres sur l'océan :

Surface du globe occupée : **70,7 %**
Profondeur moyenne : **3700m**

L'océan représente plus de **97 %**
du contenu en eau terrestre.

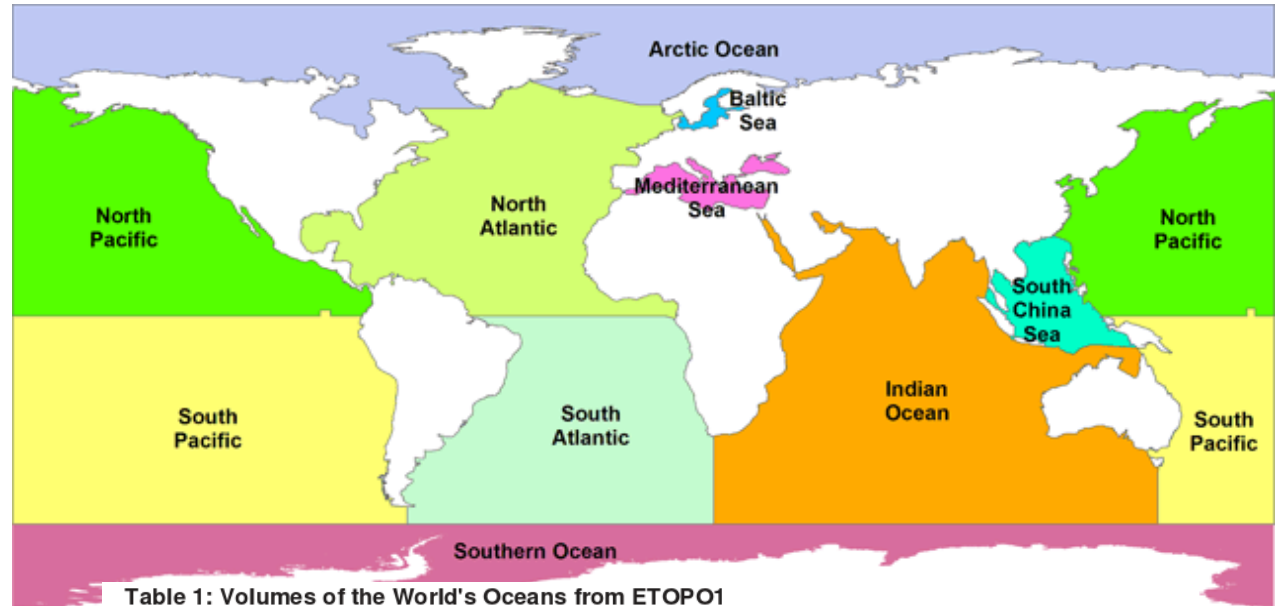
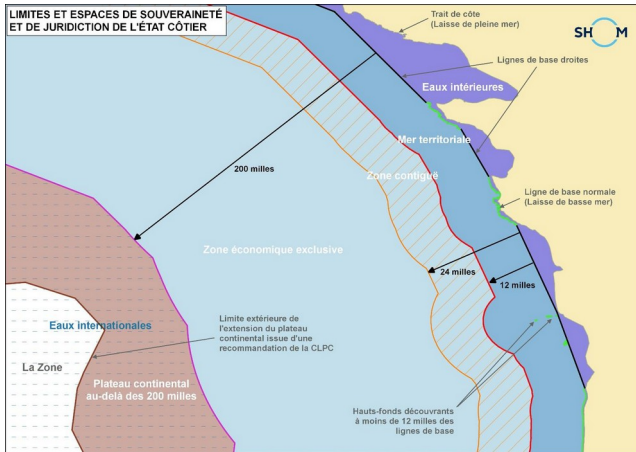


Table 1: Volumes of the World's Oceans from ETOPO1

	Area ⁺ (km ²)	% Ocean Area	Volume (km ³)	% Ocean Volume	Avg. Depth (m)	Max Depth (m)
Arctic Ocean	15,558,000	4.3	18,750,000	1.4	1205	5567
Atlantic Ocean	85,133,000	23.5	310,410,900	23.3	3646	8486
Baltic Sea	406,000	0.1	20,900	0.0	51	392
Mediterranean	2,967,000	0.8	4,390,000	0.3	1480	5139
North Atlantic	41,490,000	11.5	146,000,000	10.9	3519	8486
South Atlantic	40,270,000	11.1	160,000,000	12.0	3973	8240
Indian Ocean	70,560,000	19.5	264,000,000	19.8	3741	7906
Pacific Ocean	161,760,000	44.7	660,000,000	49.4	4080	10,803
North Pacific	77,010,000	21.3	331,000,000	24.8	4298	10,803 [#]
South Pacific	84,750,000	23.4	329,000,000	24.6	3882	10,753
South China Sea	6,963,000	1.9	9,880,000	0.7	1419	7352
Southern Ocean*	21,960,000	6.1	71,800,000	5.4	3270	7075
Total:	361,900,000⁰	100.0	1,335,000,000	100.0	3688	10,803
Error Estimates:	0.1%		1%			

Côtier / hauturier



Océanographie



L'océanographie **est une discipline scientifique**, faisant partie des sciences de la Terre, consacrée à l'étude des mers et des océans.

L'océanographie est un champ de la géographie physique qui a pour but de décrire, comparer et expliquer les enveloppes superficielles terrestres.

L'océanographie chimique

- décrit la composition chimique de l'eau de mer,
- analyse les principaux processus expliquant les variations spatiales et temporelles de cette composition

L'océanographie chimique contribue à la compréhension des flux de matière dans l'océan et à ses interfaces

Composition chimique de l'eau de mer

Table 3 Standard mean chemical composition of sea water ($S = 35$).

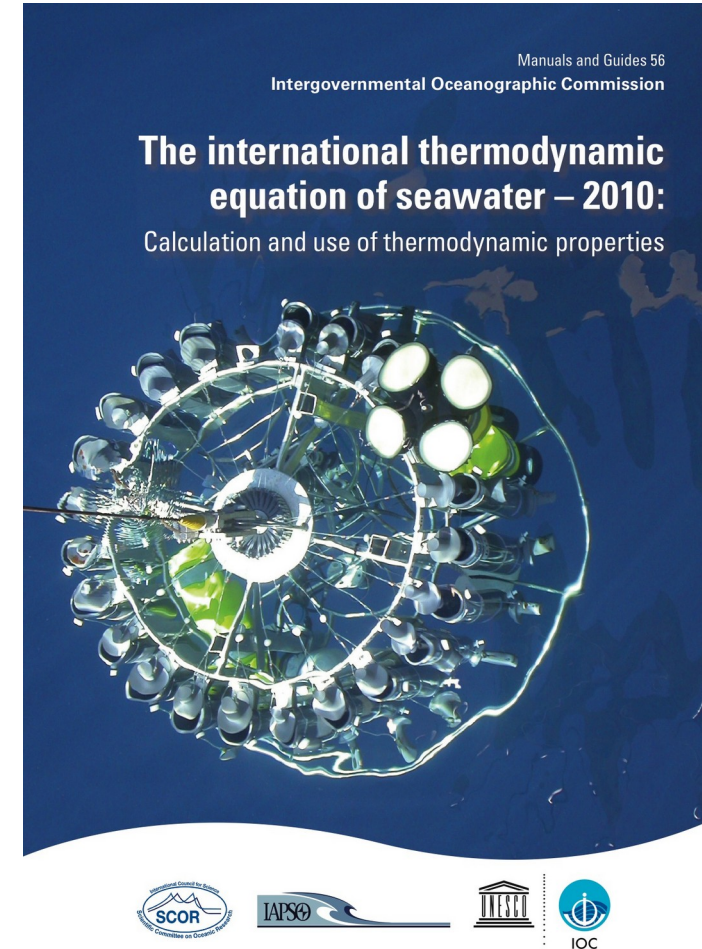
Species	mol kg-soln ⁻¹	g kg-soln ⁻¹	mol kg-H ₂ O ⁻¹	g kg-H ₂ O ⁻¹
Cl ⁻	0.54586	19.3524	0.56576	20.0579
SO ₄ ²⁻	0.02824	2.7123	0.02927	2.8117
Br ⁻	0.00084	0.0673	0.00087	0.0695
F ⁻	0.00007	0.0013	0.00007	0.0013
Na ⁺	0.46906	10.7837	0.48616	11.1768
Mg ²⁺	0.05282	1.2837	0.05475	1.3307
Ca ²⁺	0.01028	0.4121	0.01065	0.4268
K ⁺	0.01021	0.3991	0.01058	0.4137
Si ²⁺	0.00009	0.0079	0.00009	0.0079
B(OH) ₃	0.00032	0.0198	0.00033	0.0204
B(OH) ₄ ⁻	0.00010	0.0079	0.00010	0.0079
CO ₂ [*]	0.00001	0.0004	0.00001	0.0004
HCO ₃ ⁻	0.00177	0.1080	0.00183	0.1117
CO ₃ ²⁻	0.00026	0.0156	0.00027	0.0162
OH ⁻	0.00001	0.0002	0.00001	0.0002
sum of column	1.11994	35.1717	1.16075	36.4531
ionic strength	0.69734	—	0.72275	—

Salinité et équation d'état de l'eau de mer

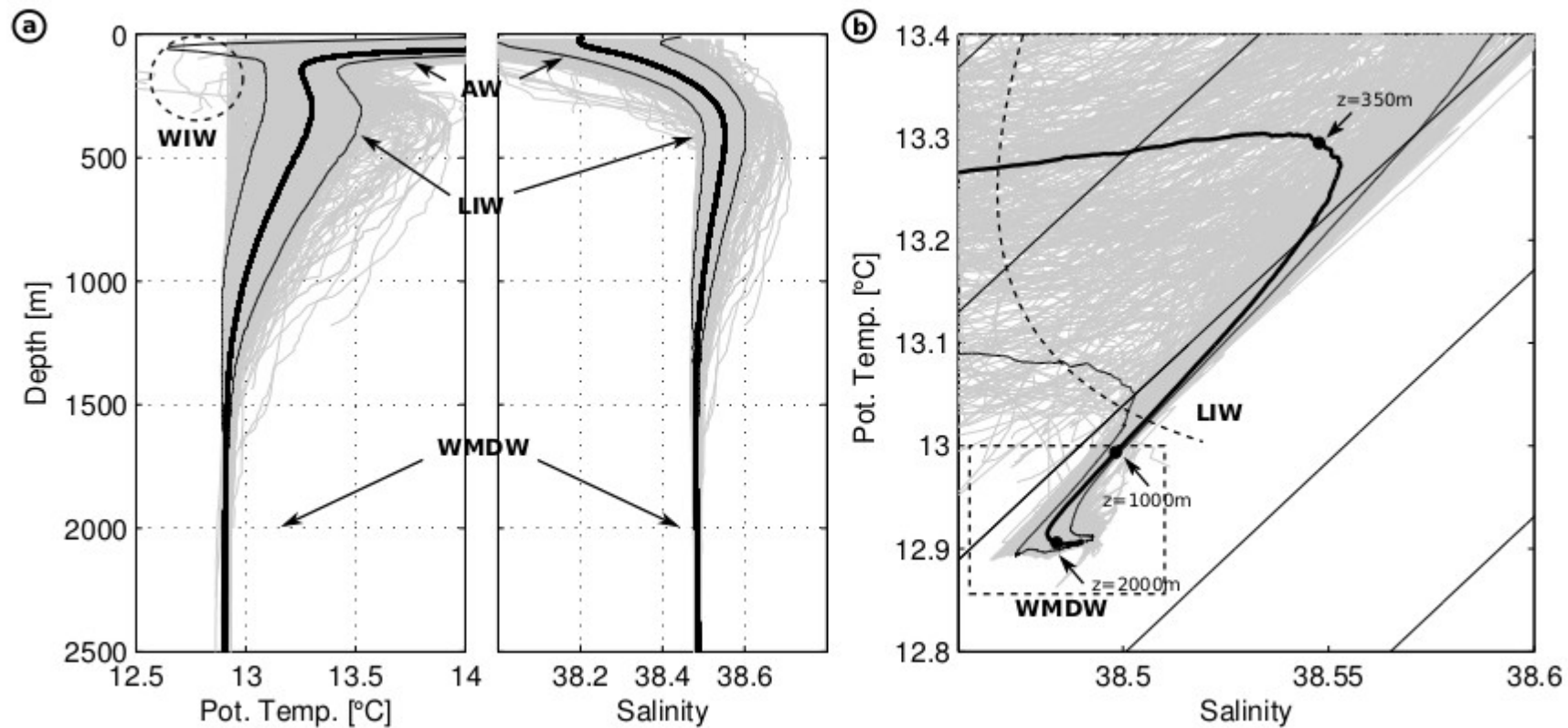
Le contenu en espèces dissoutes dans l'eau de mer est décrit par une grandeur : **la salinité**.

Celle-ci est définie comme la masse d'espèces dissoutes en g dans un kg d'eau de mer

Toutes les propriétés thermodynamiques d'une parcelle d'eau dans l'océan peuvent être estimées à partir **de la salinité, de la température et de la pression** par les équations thermodynamiques de l'eau de mer (TEOS-10).

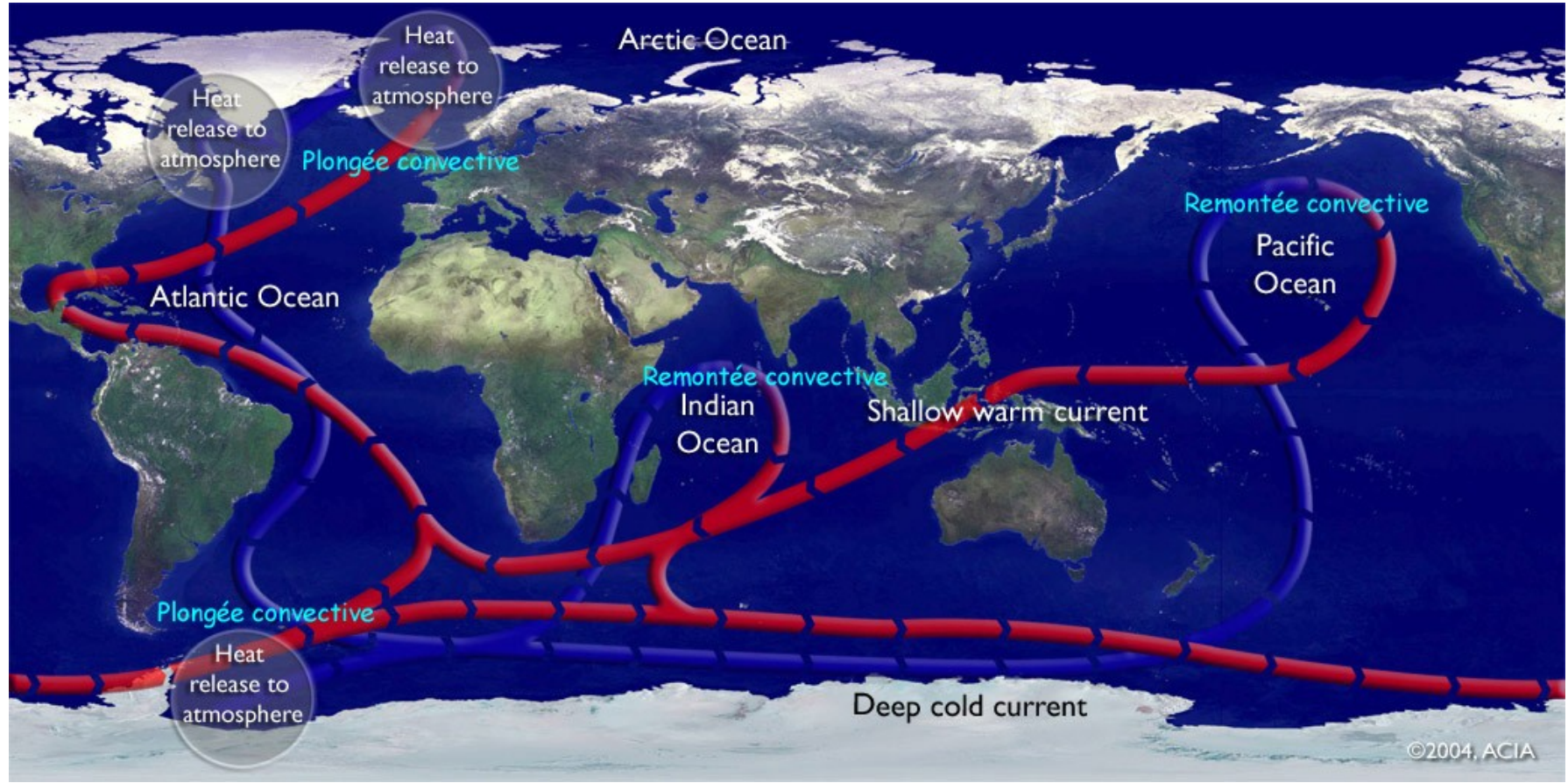


Propriétés de la colonne d'eau



Thèse de A. Bosse, 2015

La circulation thermohaline globale



modifié par Eric Denoux, d'après <http://amap.no/acia/>

Le contenu en carbone océanique

Le contenu en carbone de l'eau de mer est constitué à **plus de 95 % de carbone inorganique dissous**.

Le carbone inorganique dissous est décrit par un système d'équilibre chimique : **Le système des carbonates**.

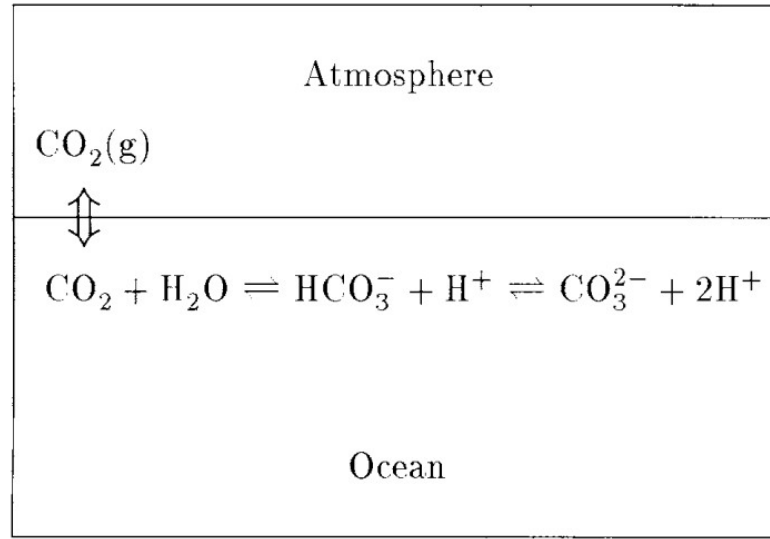
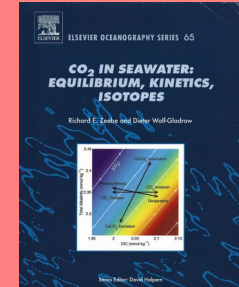
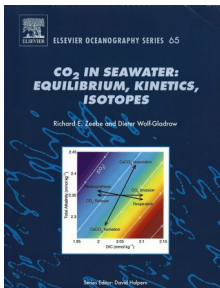
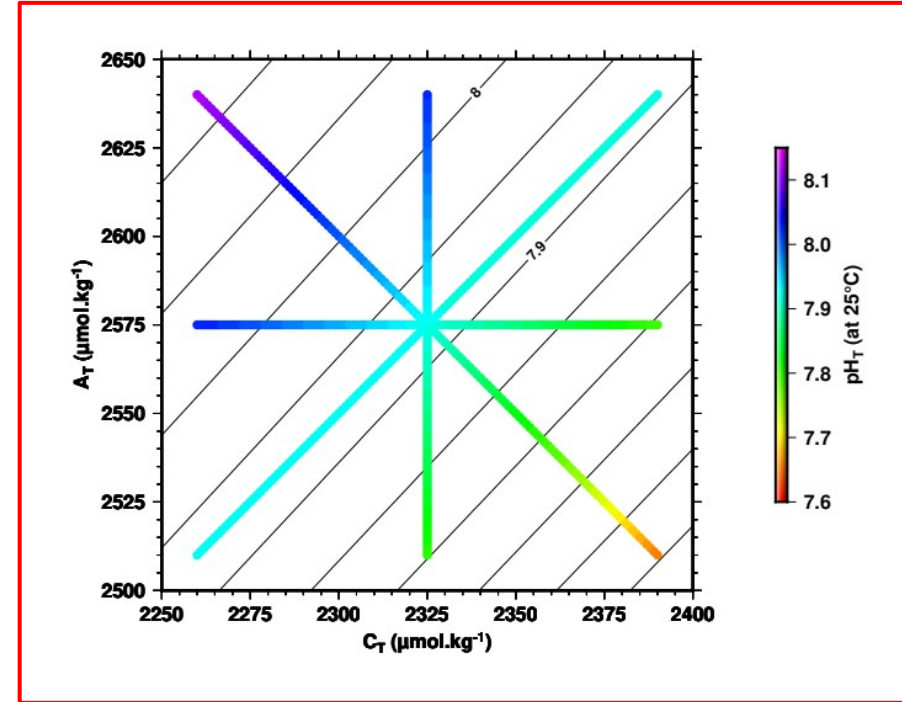
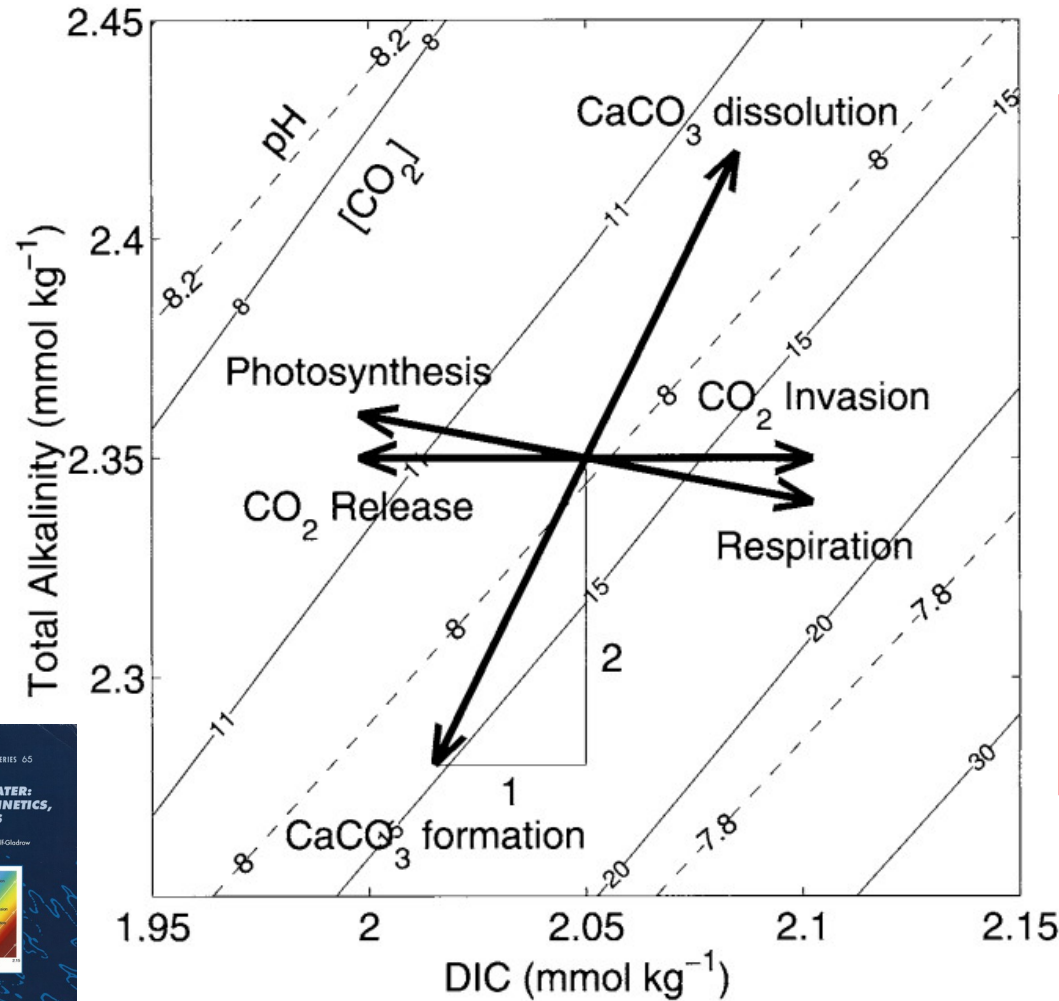


Figure 1.1.1: Schematic illustration of the carbonate system in the ocean. CO₂ is exchanged between atmosphere and ocean via equilibration of CO₂(g) and dissolved CO₂. Dissolved CO₂ is part of the carbonate system in seawater that includes bicarbonate, HCO₃⁻, and carbonate ion, CO₃²⁻.



Le système des carbonates océanique



Composition chimique de l'eau de mer

Abundance of Elements in Seawater Near the Surface

Abundance values in mg/L

1 H 1.08 x 10 ³ Hydrogen																	2 He 7 x 10 ⁻⁴ Helium				
3 Li 0.18 Lithium	4 Be 5.6 x 10 ⁻⁴ Beryllium															5 B 4.44 Boron	6 C 28 Carbon	7 N 0.5 Nitrogen	8 O 8.57 x 10 ³ Oxygen	9 F 1.3 Fluorine	10 Ne 1.2 x 10 ⁻⁴ Neon
11 Na 1.08 x 10 ⁴ Sodium	12 Mg 1.29 x 10 ³ Magnesium															13 Al 2 x 10 ⁻³ Aluminium	14 Si 2.2 Silicon	15 P 6 x 10 ⁻³ Phosphorus	16 S 905 Sulfur	17 Cl 1.94 x 10 ⁴ Chlorine	18 Ar 0.45 Argon
19 K 399 Potassium	20 Ca 412 Calcium	21 Sc 6 x 10 ⁻⁷ Scandium	22 Ti 1 x 10 ⁻³ Titanium	23 V 2.5 x 10 ⁻³ Vanadium	24 Cr 3 x 10 ⁻⁴ Chromium	25 Mn 2 x 10 ⁻⁴ Manganese	26 Fe 2 x 10 ⁻³ Iron	27 Co 2 x 10 ⁻⁵ Cobalt	28 Ni 5.6 x 10 ⁻⁴ Nickel	29 Cu 2.5 x 10 ⁻⁴ Copper	30 Zn 4.9 x 10 ⁻⁴ Zinc	31 Ga 3 x 10 ⁻³ Gallium	32 Ge 5 x 10 ⁻⁴ Germanium	33 As 3.7 x 10 ⁻³ Arsenic	34 Se 2 x 10 ⁻⁴ Selenium	35 Br 67.3 Bromine	36 Kr 2.1 x 10 ⁻⁴ Krypton				
37 Rb 0.12 Rubidium	38 Sr 7.9 Strontium	39 Y 1.3 x 10 ⁻⁵ Yttrium	40 Zr 3 x 10 ⁻⁵ Zirconium	41 Nb 1 x 10 ⁻⁵ Niobium	42 Mo 1 x 10 ⁻⁵ Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru 7 x 10 ⁻⁷ Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag 4 x 10 ⁻⁵ Silver	48 Cd 1.1 x 10 ⁻⁴ Cadmium	49 In 2 x 10 ⁻⁵ Indium	50 Sn 4 x 10 ⁻⁴ Tin	51 Sb 2.4 x 10 ⁻⁴ Antimony	52 Te Tellurium	53 I 6 x 10 ⁻³ Iodine	54 Xe 5 x 10 ⁻⁵ Xenon				
55 Cs 3 x 10 ⁻⁴ Cesium	56 Ba 1.3 x 10 ⁻² Barium	57-71 Lanthanides	72 Hf 7 x 10 ⁻⁶ Hafnium	73 Ta 2 x 10 ⁻⁶ Tantalum	74 W 1 x 10 ⁻⁴ Tungsten	75 Re 4 x 10 ⁻⁶ Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au 4 x 10 ⁻⁵ Gold	80 Hg 3 x 10 ⁻⁵ Mercury	81 Tl 1.9 x 10 ⁻⁵ Thallium	82 Pb 3 x 10 ⁻⁵ Lead	83 Bi 2 x 10 ⁻⁵ Bismuth	84 Po 1.5 x 10 ⁻¹⁴ Polonium	85 At Astatine	86 Rn 6 x 10 ⁻¹⁶ Radon				
87 Fr Francium	88 Ra 8.9 x 10 ⁻¹¹ Radium	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessee	118 Og Oganesson				
			57 La 3.4 x 10 ⁻⁶ Lanthanum	58 Ce 1.2 x 10 ⁻⁶ Cerium	59 Pr 6.4 x 10 ⁻⁷ Praseodymium	60 Nd 2.8 x 10 ⁻⁶ Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm 4.5 x 10 ⁻⁷ Samarium	63 Eu 1.3 x 10 ⁻⁷ Europium	64 Gd 7 x 10 ⁻⁷ Gadolinium	65 Tb 1.4 x 10 ⁻⁷ Terbium	66 Dy 9.1 x 10 ⁻⁷ Dysprosium	67 Ho 2.2 x 10 ⁻⁷ Holmium	68 Er 8.7 x 10 ⁻⁷ Erbium	69 Tm 1.7 x 10 ⁻⁷ Thulium	70 Yb 8.2 x 10 ⁻⁷ Ytterbium	71 Lu 1.5 x 10 ⁻⁷ Lutetium				
			89 Ac Actinium	90 Th 1 x 10 ⁻⁶ Thorium	91 Pa 5 x 10 ⁻¹¹ Protactinium	92 U 3.2 x 10 ⁻³ Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium				

< 10⁻¹²

10⁻¹² - 10⁻⁹

10⁻⁹ - 10⁻⁶

10⁻⁶ - 10⁻³

10⁻³ - 1

1 - 10³

> 10³

©2018 Sciencenotes.org

2 : Impact des perturbations anthropiques sur l'océan

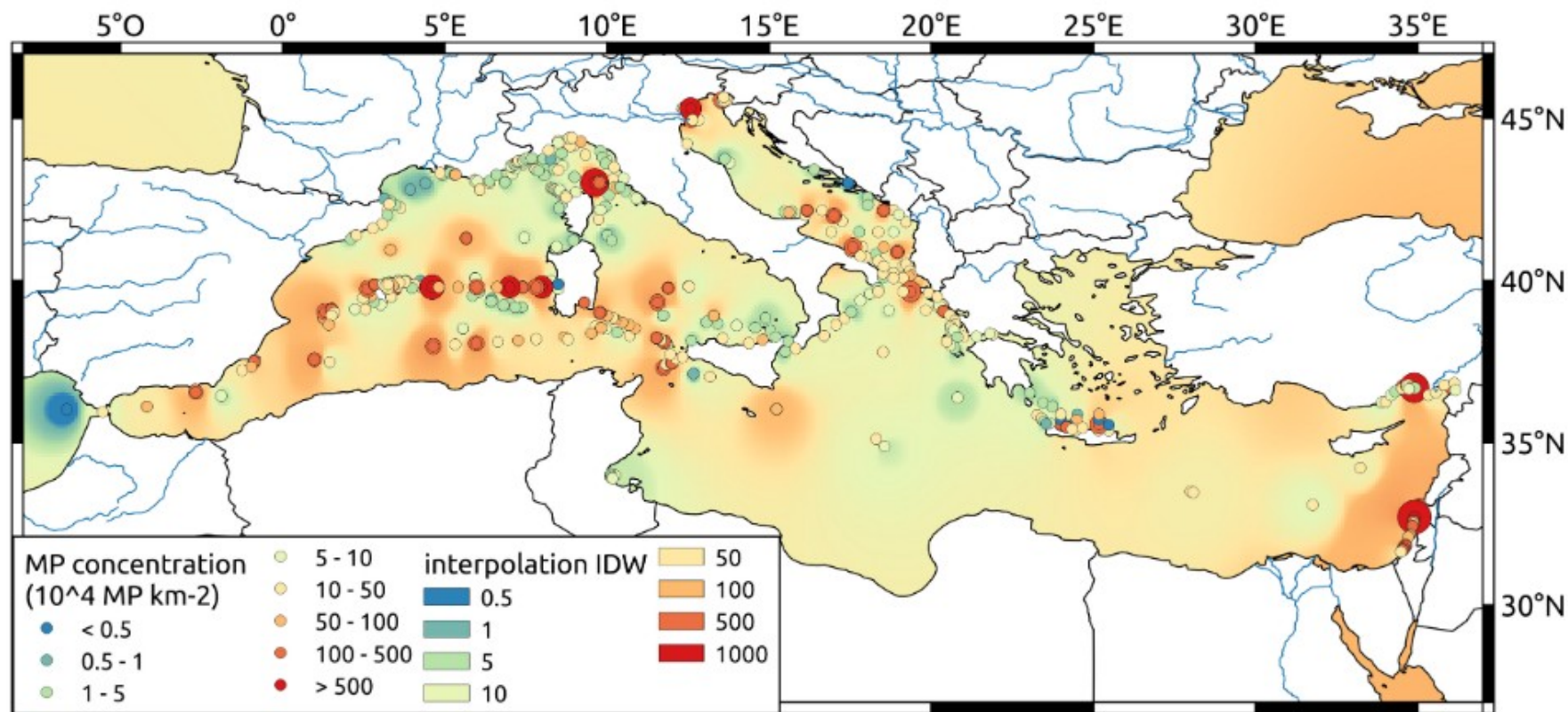


Perturbation Anthropique

Le terme d'**Anthropocène** [Crutzen et Stoermer, 2000] est parfois utilisé pour définir une nouvelle ère géologique introduite depuis que **les effets des activités humaines ont un impact global et notable à l'échelle de la planète.**

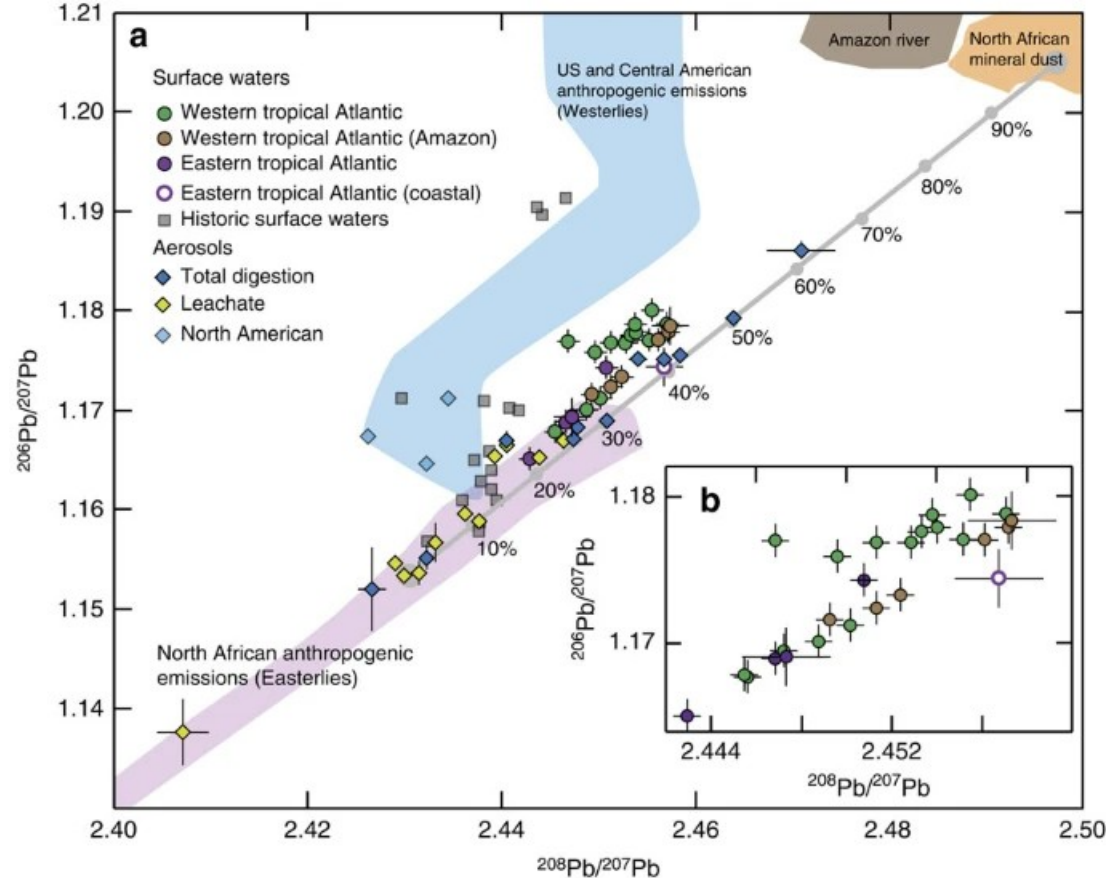
On parle de **changement global.**

Pollution par les plastiques



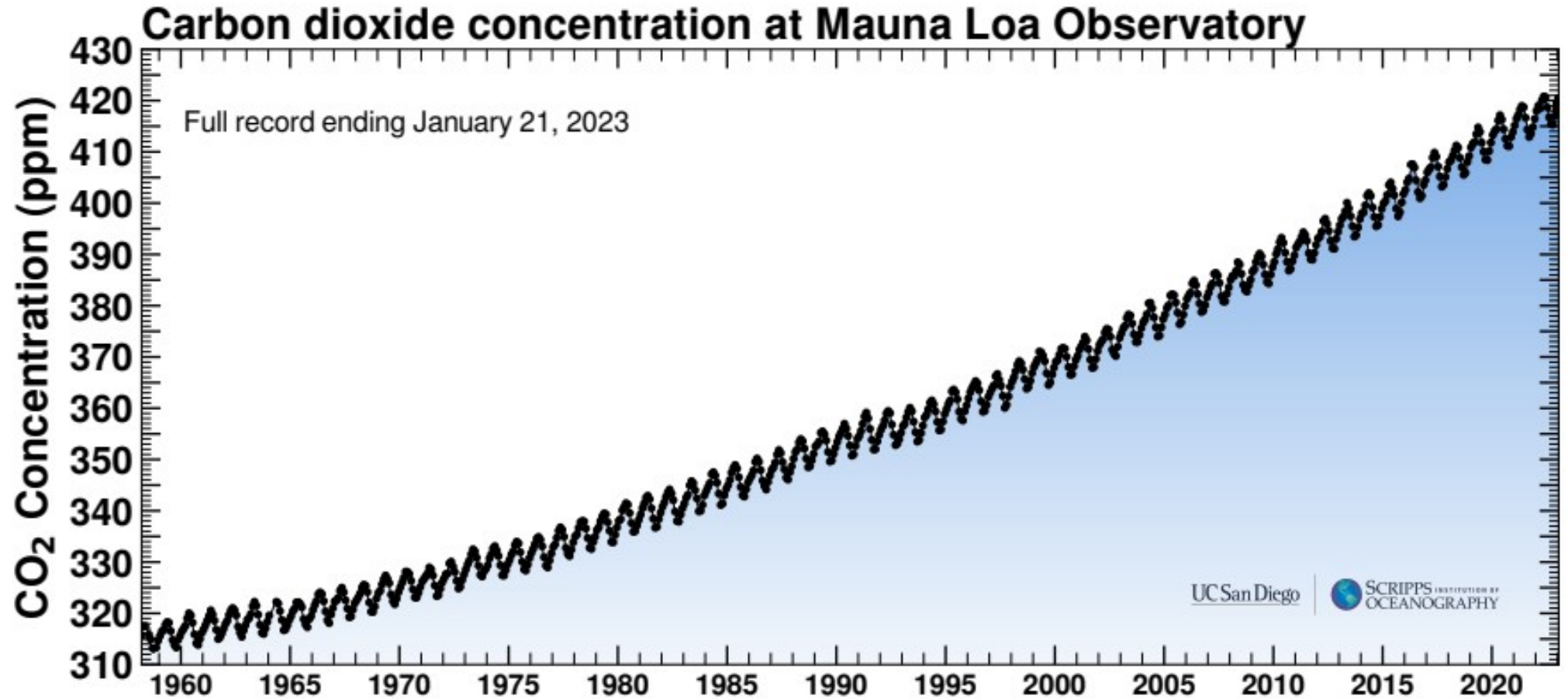
Thèse de L. Weiss, 2021

Contamination par le plomb

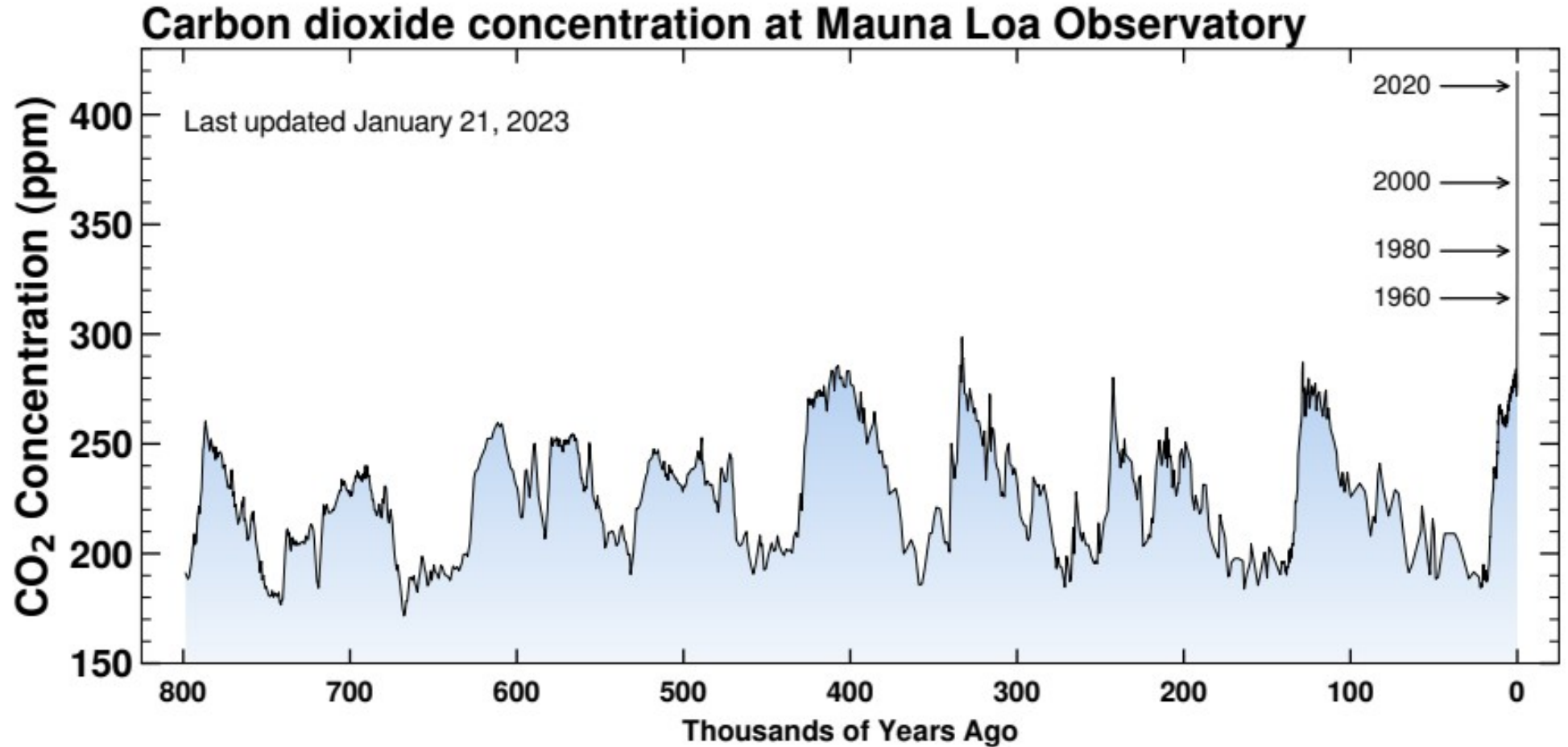


Bridgestock, L., van de Flierdt, T., Rehkämper, M., Paul, M., Middag, R., Milne, A., Lohan, M.C., Baker, A.R., Chance, R., Khondoker, R., Strekopytov, S., Humphreys-Williams, E., Achterberg, E.P., Rijkenberg, M.J.A., Gerringa, L. J.A., de Baar, H. J. W. (2016). Return of naturally sourced Pb to Atlantic surface waters. *Nature Communications*, 7, 12921. doi:10.1038/ncomms129

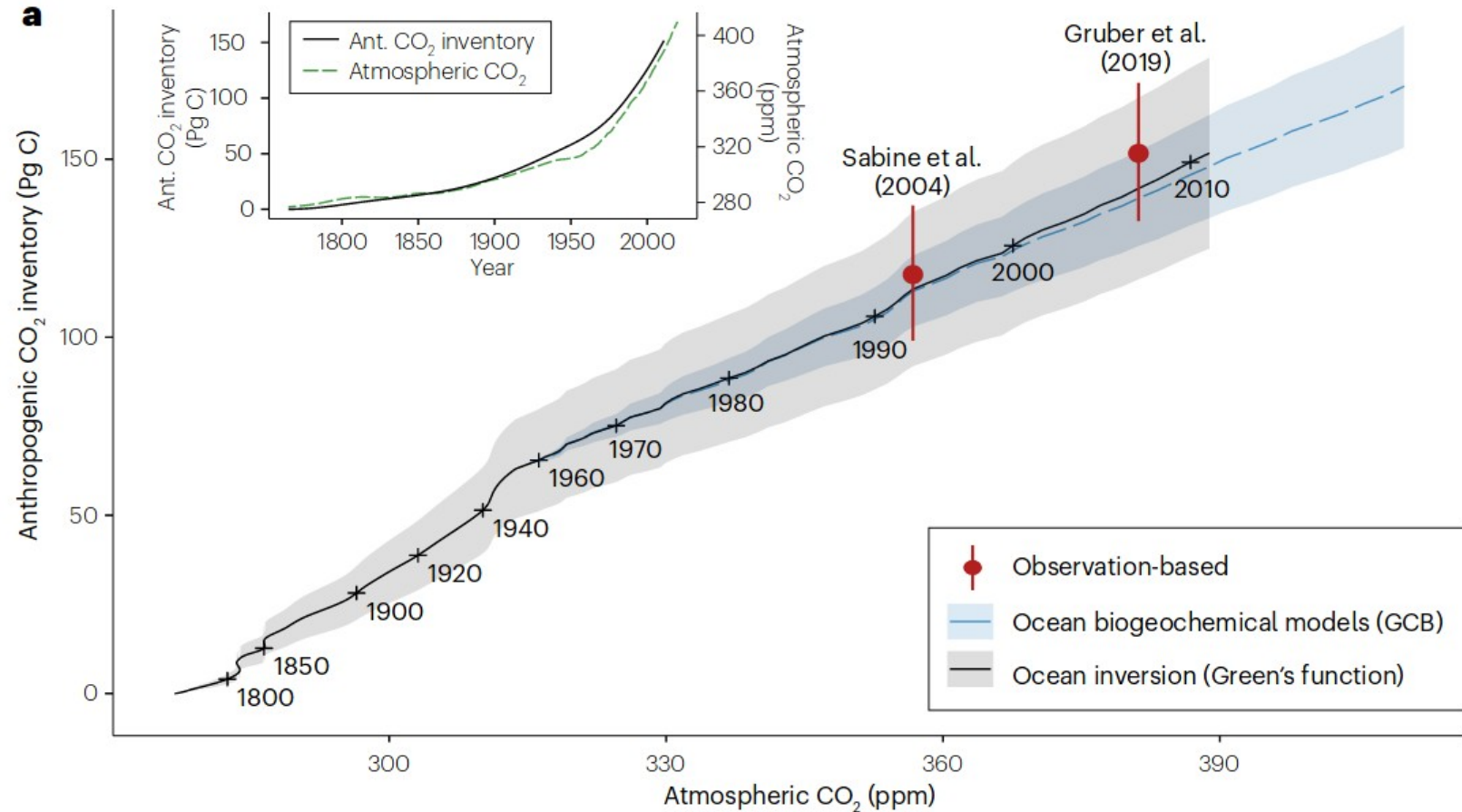
Augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique (1)



Augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique (2)



Accumulation de CO_2 anthropique dans l'océan

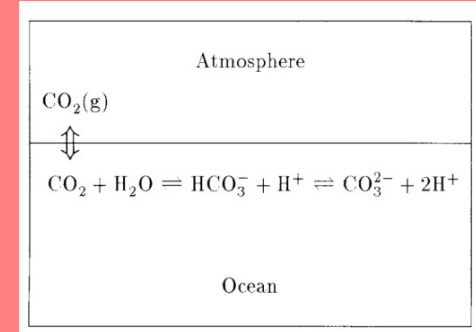


Gruber et al. 2023

Acidification des océans (1)

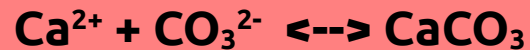
Acidification :

L'accumulation de CO_2 dans l'eau de mer peut être globalement décrite par la réaction chimique suivante :



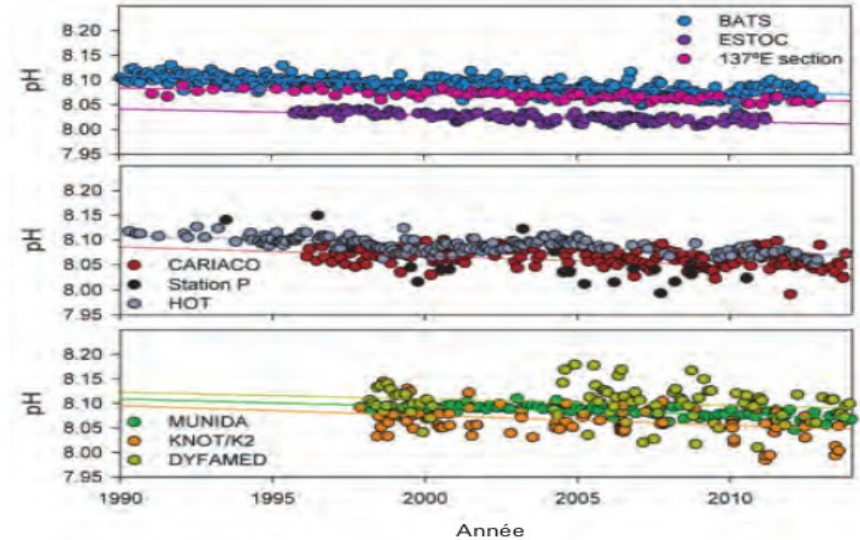
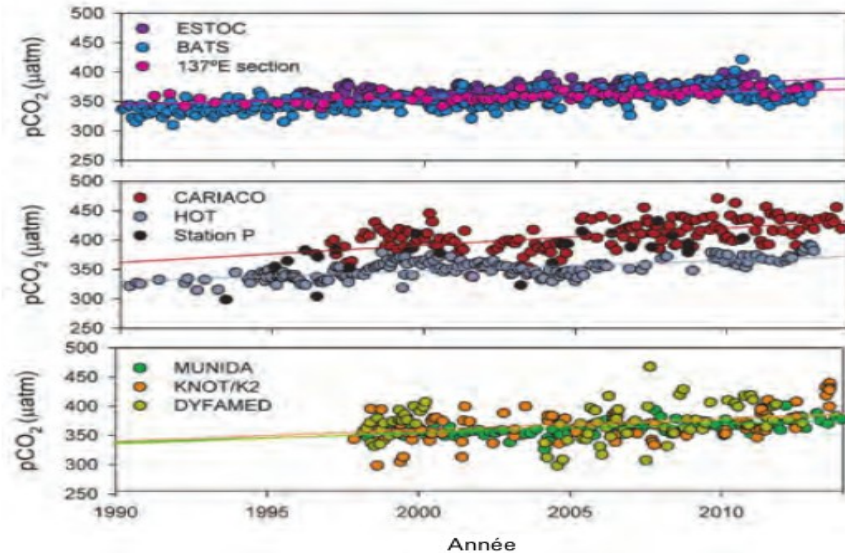
Précipitation / Dissolution du carbonate de calcium

La diminution de la concentration en ion carbonate (CO_3^{2-}) dans l'eau de mer affecte l'équilibre de solubilité du carbonate de calcium



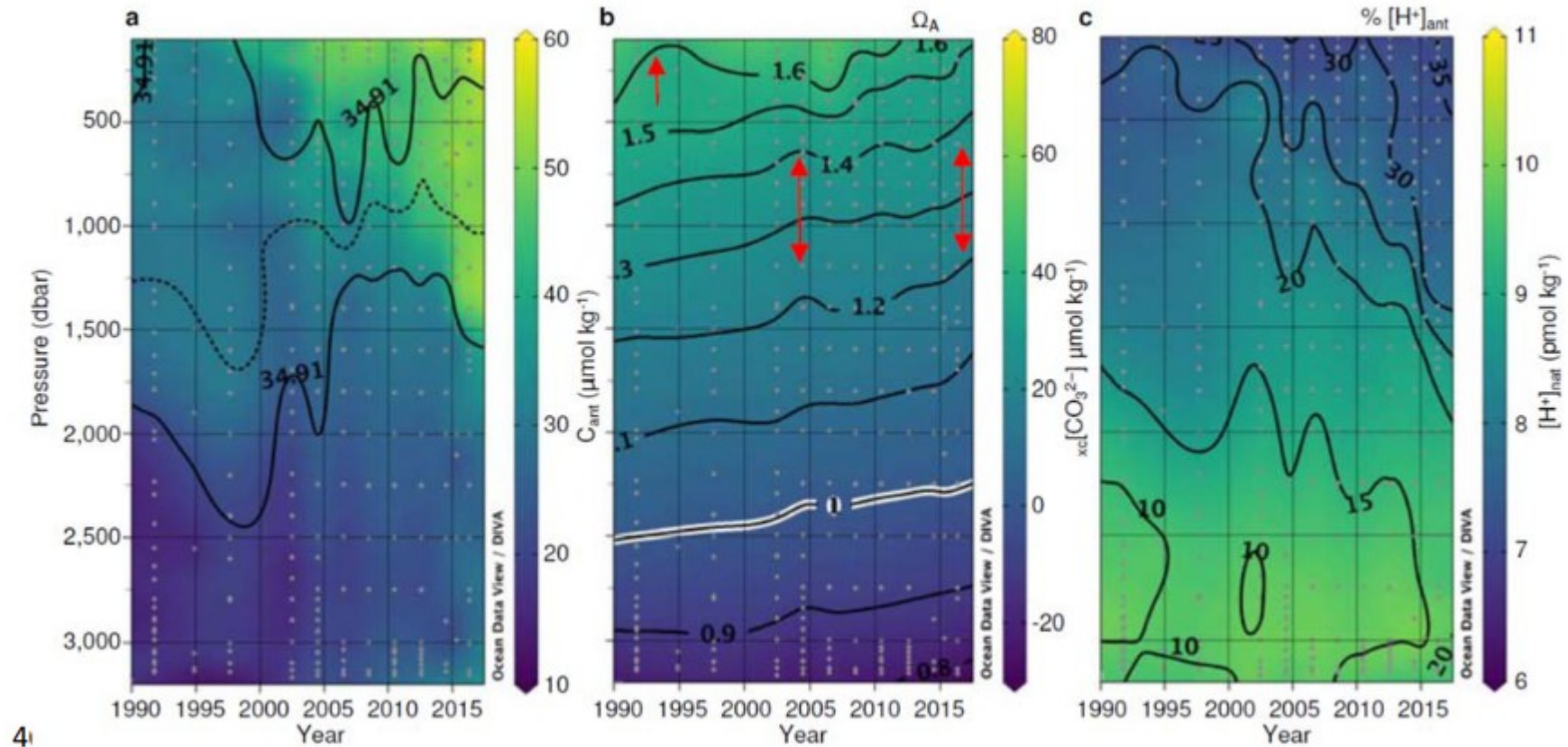
Ceci affecte directement les organismes qui forment leur squelette en carbonate de calcium.

Acidification des océans (2)



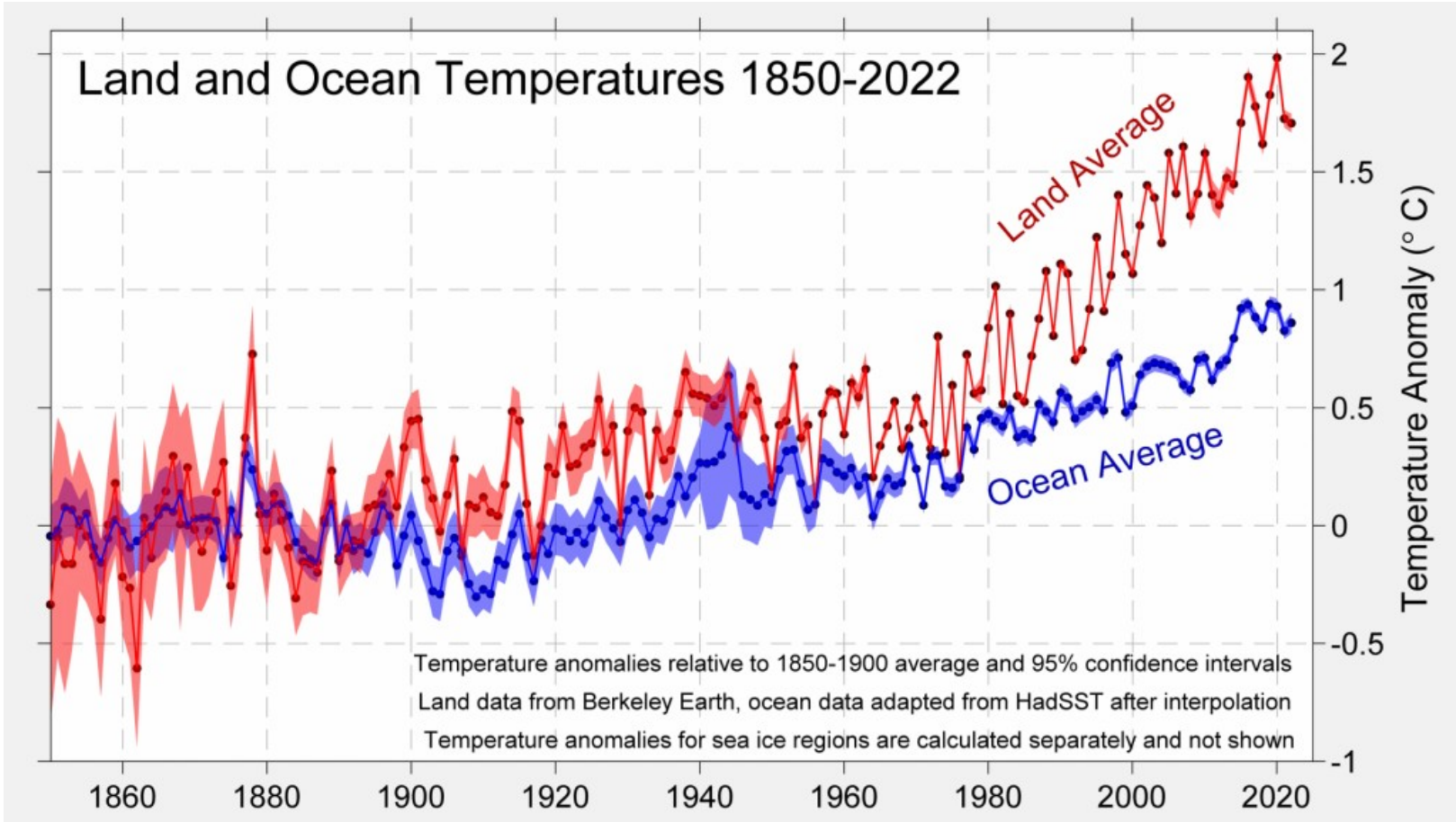
« ... While there are seasonal and inter-annual variations in CO_2 dissolved in ocean water, $p\text{CO}_2$, this has increased at a rate of 1.3 to 2.8 microatmospheres (μatm) per year (...), while ocean surface pH has decreased during the period of observations at an average rate of -0.0013 per year to -0.0024 per year, **depending on the location.** ... »

Acidification des océans (3)



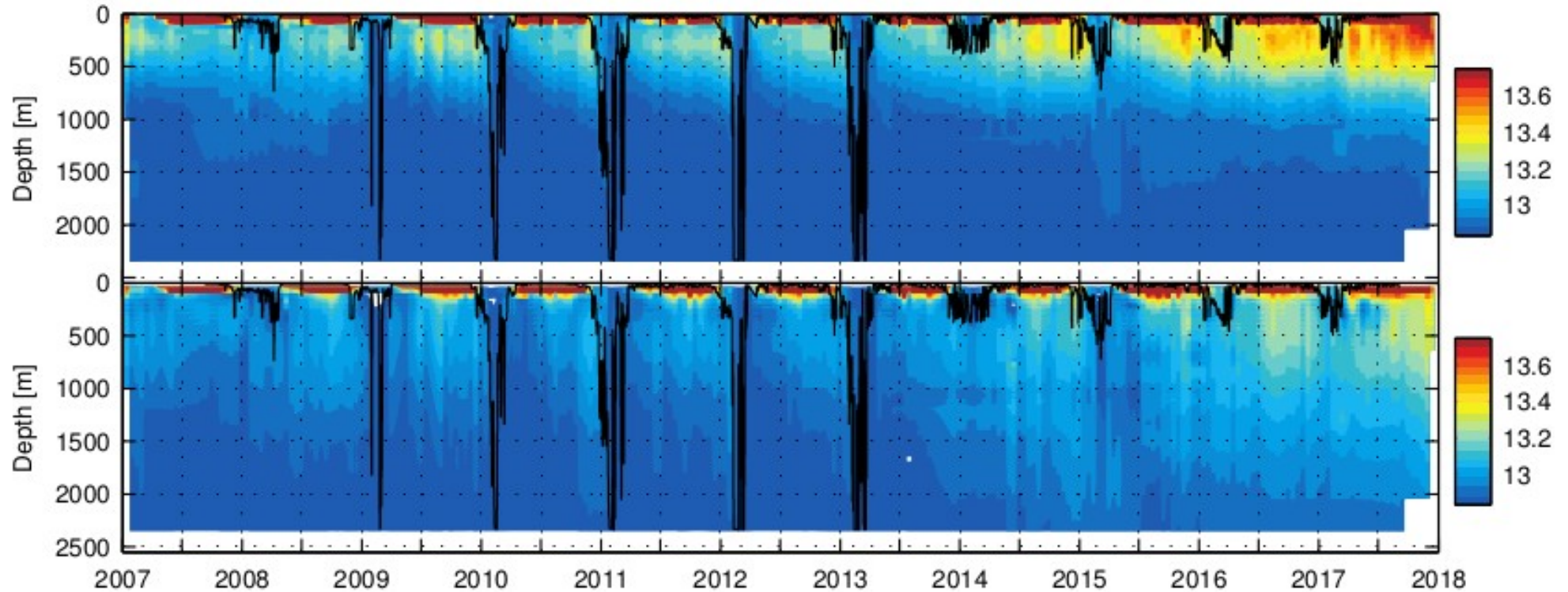
Perez et al - 2018

Augmentation de la température de la surface du globe



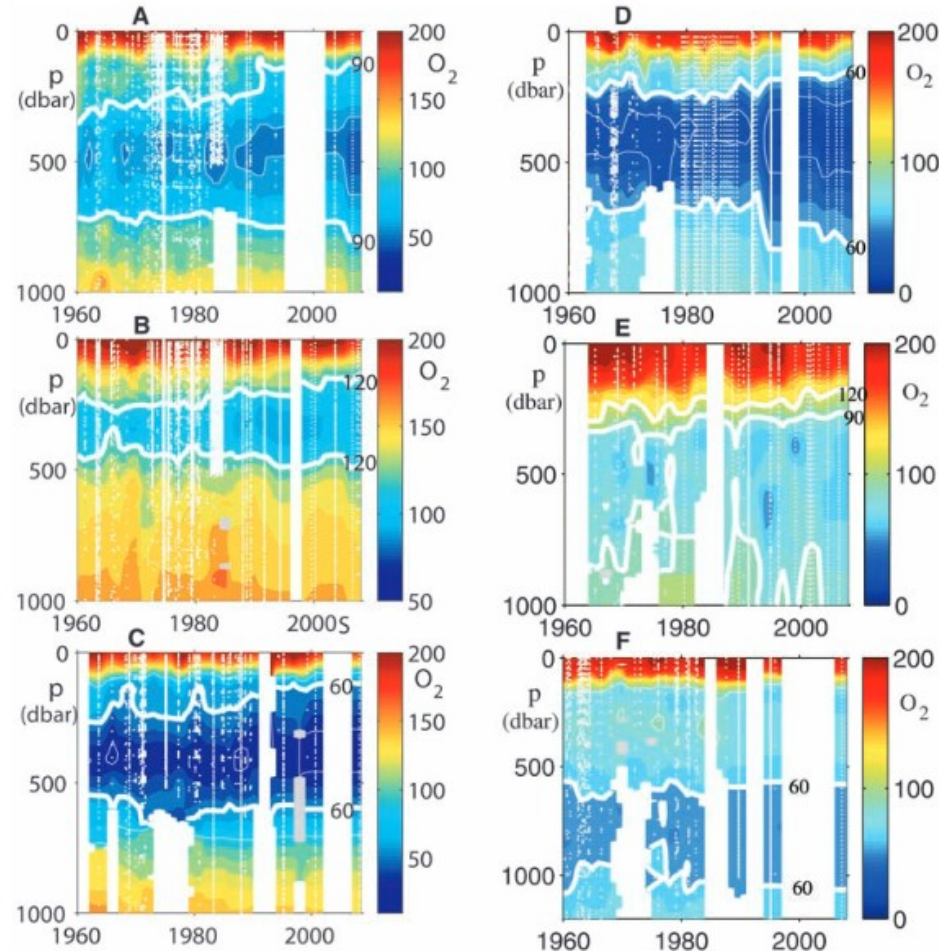
<https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2022/>

Changement dans la convection profonde



Thèse de F. Margirier, 2018

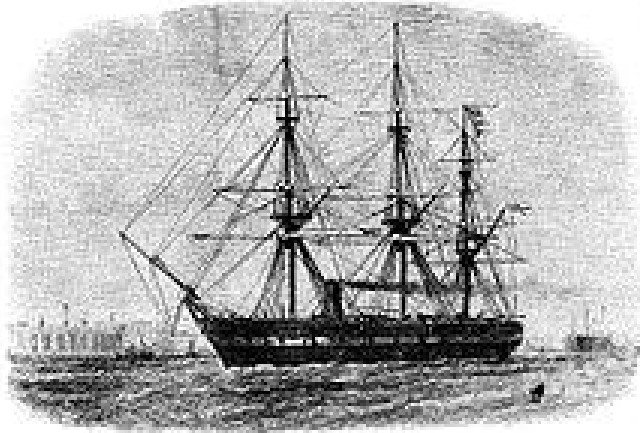
Appauvrissement en oxygène des eaux intermédiaires



Stramma et al, 2008

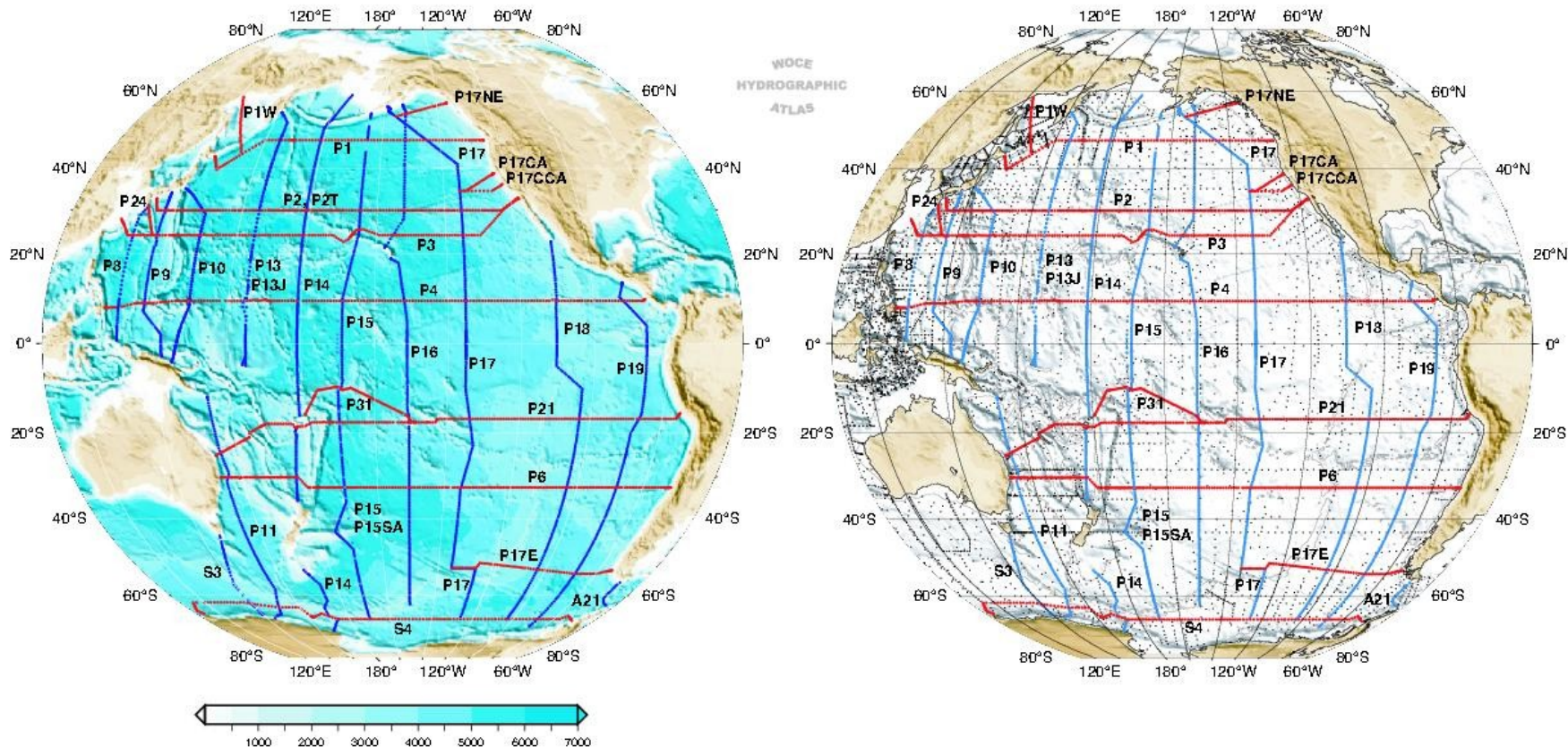
3 : Une révolution dans les techniques d'observation des océans

Expéditions océanographiques



Campagnes océanographiques coordonnées

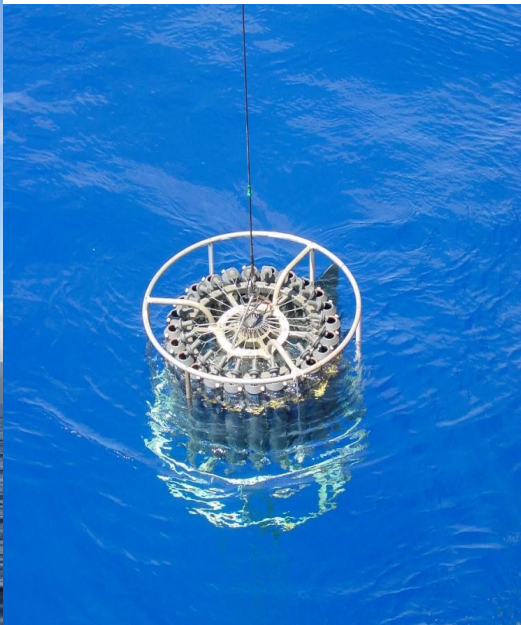
Oceanographic Sections and Stations used in the Pacific WOCE Atlas



La flotte océanographique française



Collecte de données et d'échantillons



Observation des océans par satellite (1)



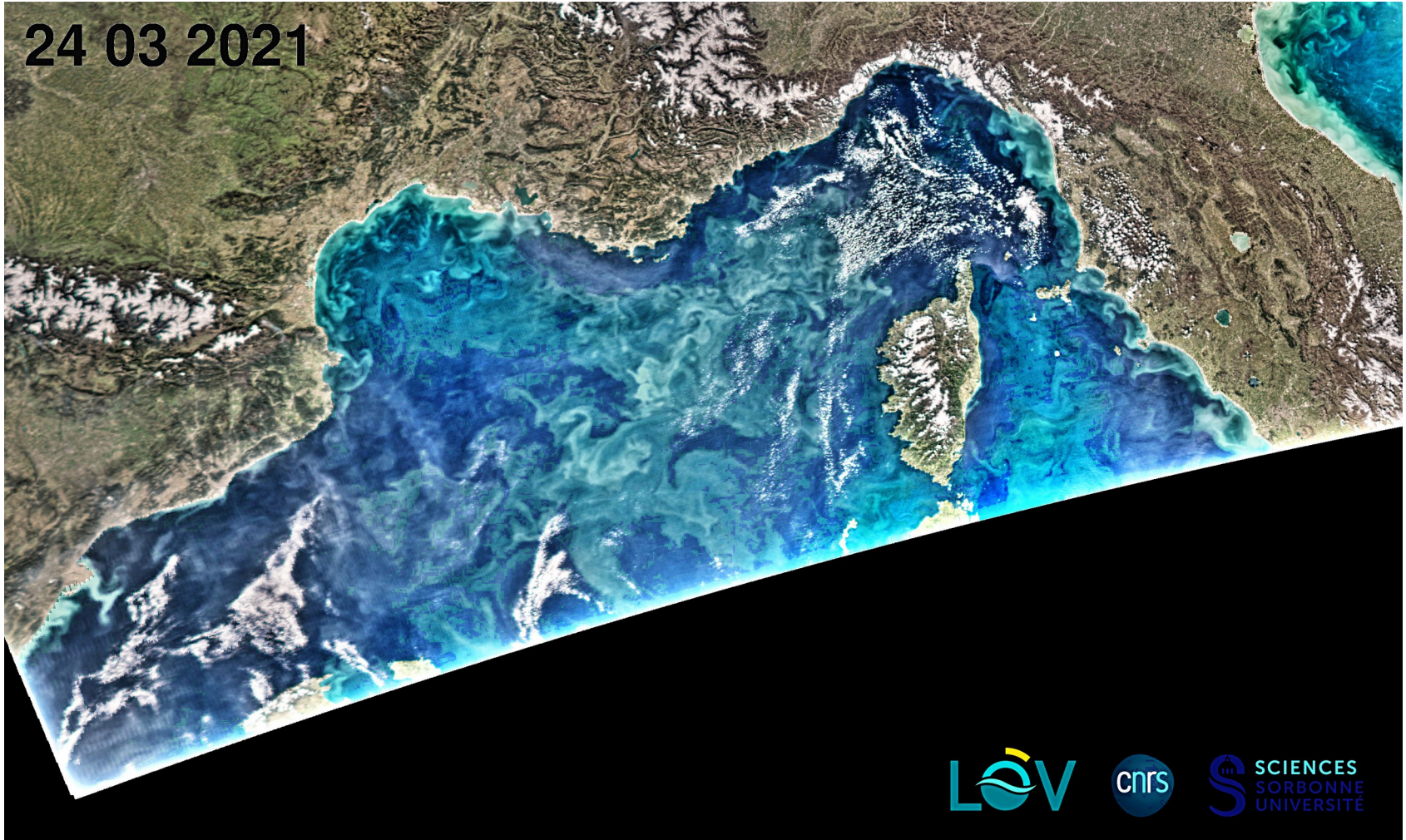
Les satellites offrent une vision globale, continue et homogène de la surface des océans.

Les satellites permettent de mesurer :

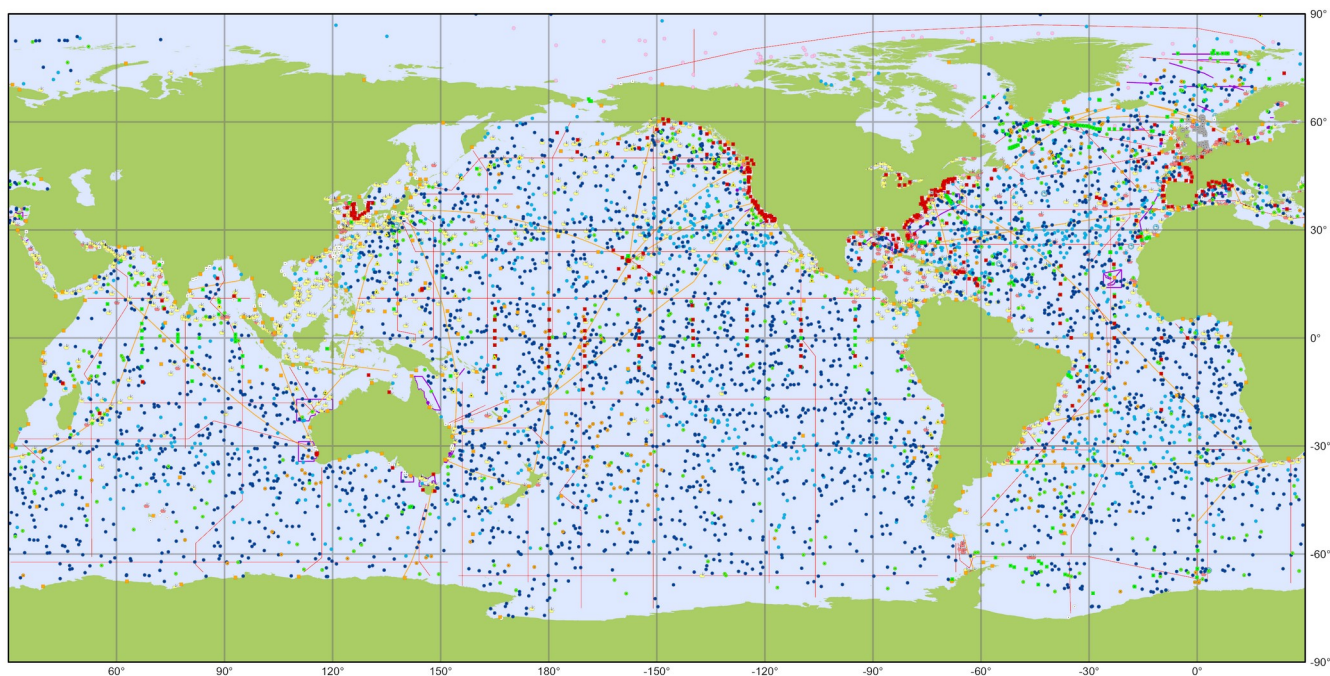
- La température de surface
- La topographie océanique
- Les vents de surface
- La couleur de l'eau
- La salinité de surface

Observation des océans par satellite (2)

24 03 2021



Systèmes d'observation océanique



Global ocean observing system

December 2022

In situ operational platforms monitored by OceanOPS

Mobile systems

- Core floats - Argo
- Deep floats - Argo
- Biogeochemistry floats - Argo
- Underwater gliders - OceanGliders
- Drifting buoys - DBCP

Fixed systems

- Polar buoys - DBCP
- Animal borne sensors
- ▲ Tsunameters - DBCP
- Offshore platforms - DBCP
- Moored buoys - DBCP

Ship based measurements

- Ocean reference stations - OceansITES
- Sea level gauges - GLOSS
- High Frequency radars
- Manned weather stations - SOT/VOS
- Automated weather stations - SOT/VOS

- Radiosondes - SOT/ASAP

Reference lines and areas

- Repeat hydrography - GO-SHIP
- eXpendable BathyThermographs - SOT/SOOP
- Sampled sites - OceanGliders



Generated by ocean-ops.org, 2023-01-06
Projection: World Plate Carree (-150,0000)

Lignes de mouillage instrumentées

50 m 3 Nokalons Locean

53 m RBR 2050 Locean n°16081

144 m BASM Locean n°18707

145 m 3 CF16 locean

151 m SBE56 MOOSE n°497

152 m Aquadopp Insu
P231-2/04

165 m µcat Locean n° 6393

195 m SBE56 MOOSE n°498

225 m SBE56 MOOSE n°499

243 m 2 CF16 Locean

246 m Aquadopp Insu
20755-1

247 m SBE56 MOOSE n°500

297 m µcat MOOSE n°9065

347 m SBE56 MOOSE n° 501

397 m SBE56 MOOSE n° 502

447 m SBE56 MOOSE n° 503

498 m 2 CF16 Locean

501 m Aquadopp
Insu n° 1975

502 m µcat MOOSE n°9066

552 m SBE56 MOOSE n° 504

602 m SBE56 MOOSE n° 505

652 m SBE56 MOOSE n° 223

702 m µcat MOOSE n°5419

856 m µcat MOOSE

991 m 4 benthos Cefrem

1002 m Aquadopp 3000m
MOOSE n°9403/ Head 4815

1093 m µcat CEFREM n°7928

1293 m µcat MOOSE n°6391

1493 m µcat CEFREM 7929

1603 m 2 benthos Cefrem

1606 m 2 benthos Cefrem

1750 m µcat MOOSE n°6392

2000 m µcat MOOSE n°6389

2132 m 2 benthos Cefrem

2135 m 2 benthos Cefrem

2293 m µcat Insu n°6153

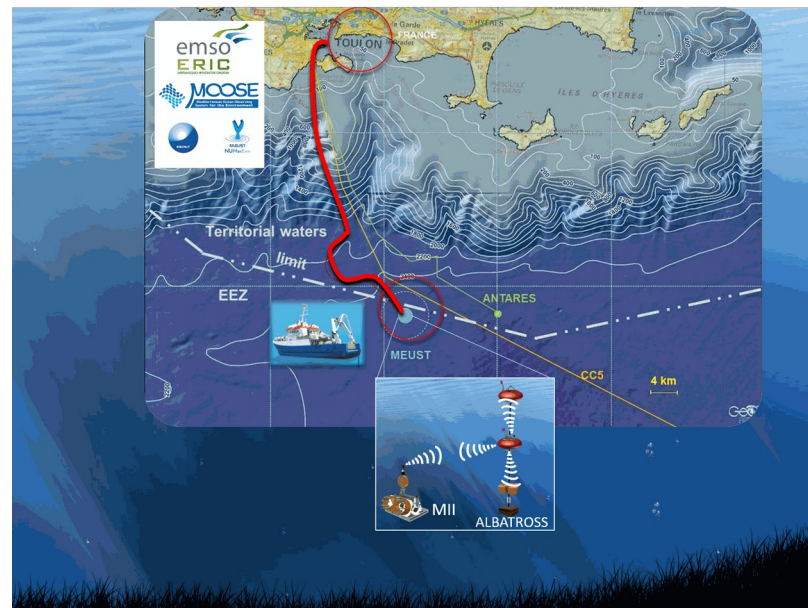
2314 m benthos Cefrem

2317 m benthos Cefrem

2323 m Aquadopp 6000m
Cefrem N° 3170

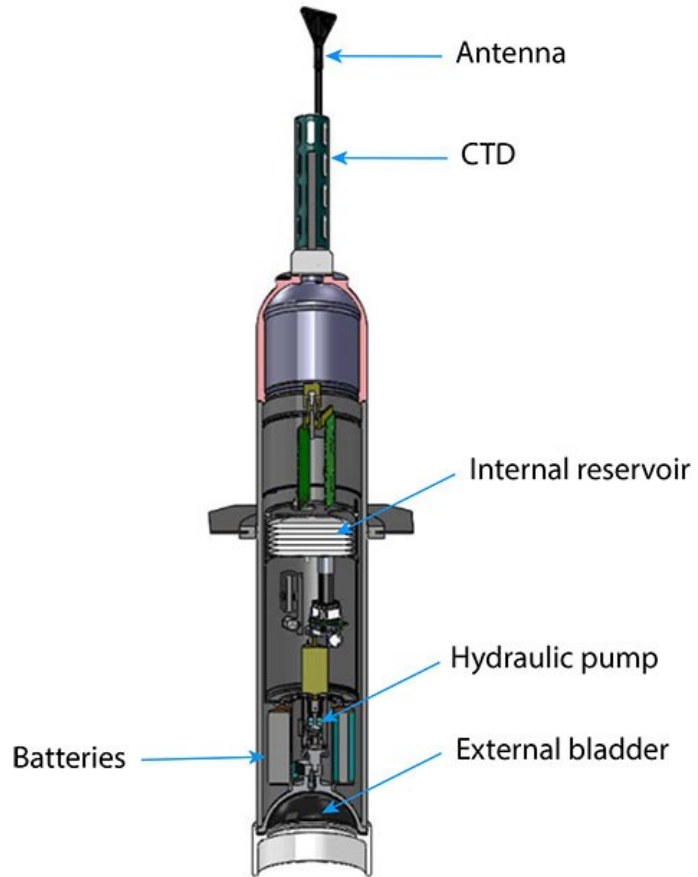
2330 m largeurs Locean n° 447
Et MOOSE n° 1376

2343m
Lest 800 Kg



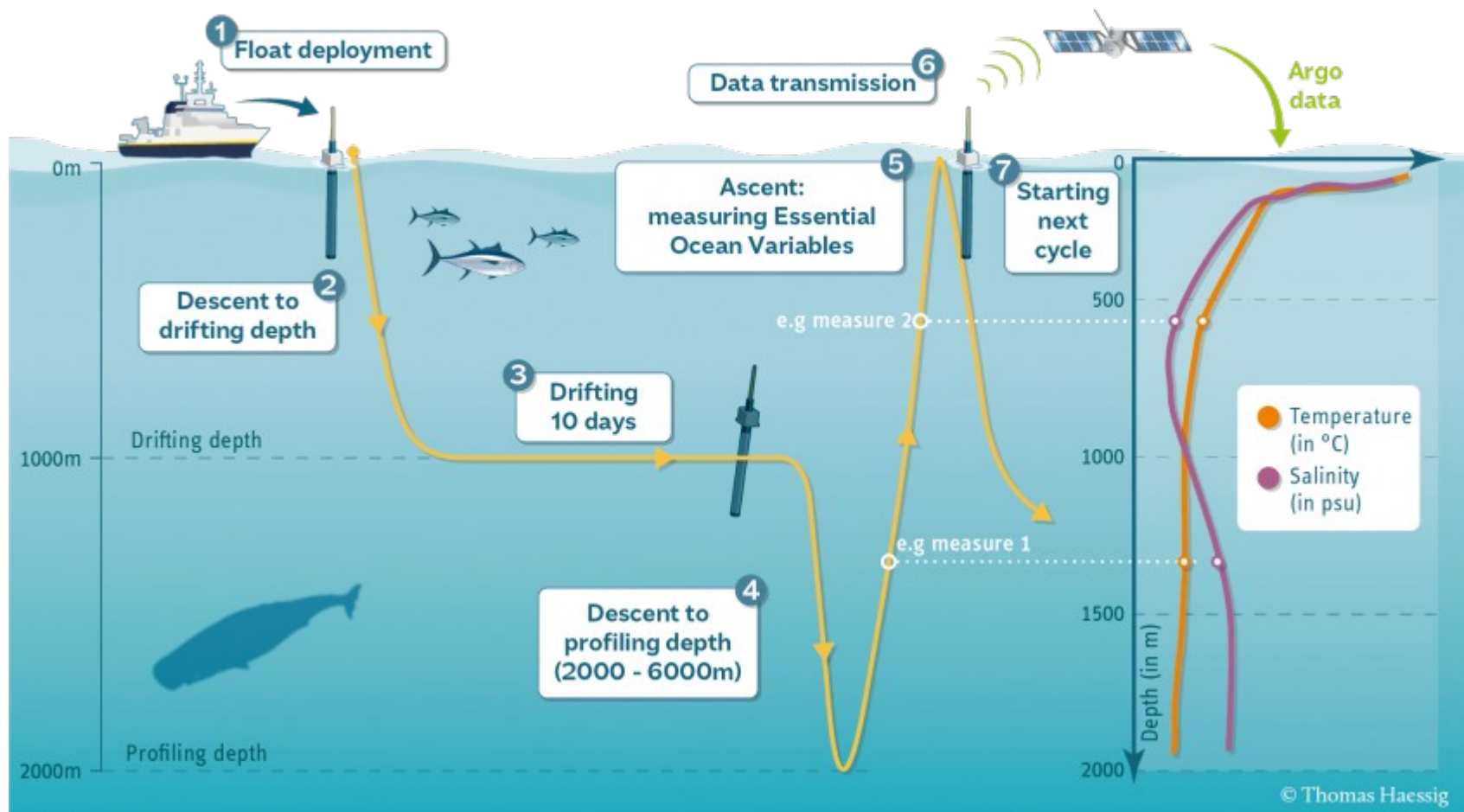
Un mouillage instrumenté est constitué de **capteurs** accrochés sur une ligne maintenue à la verticale entre un lest et une flottabilité.

Flotteurs -profileurs ARGO

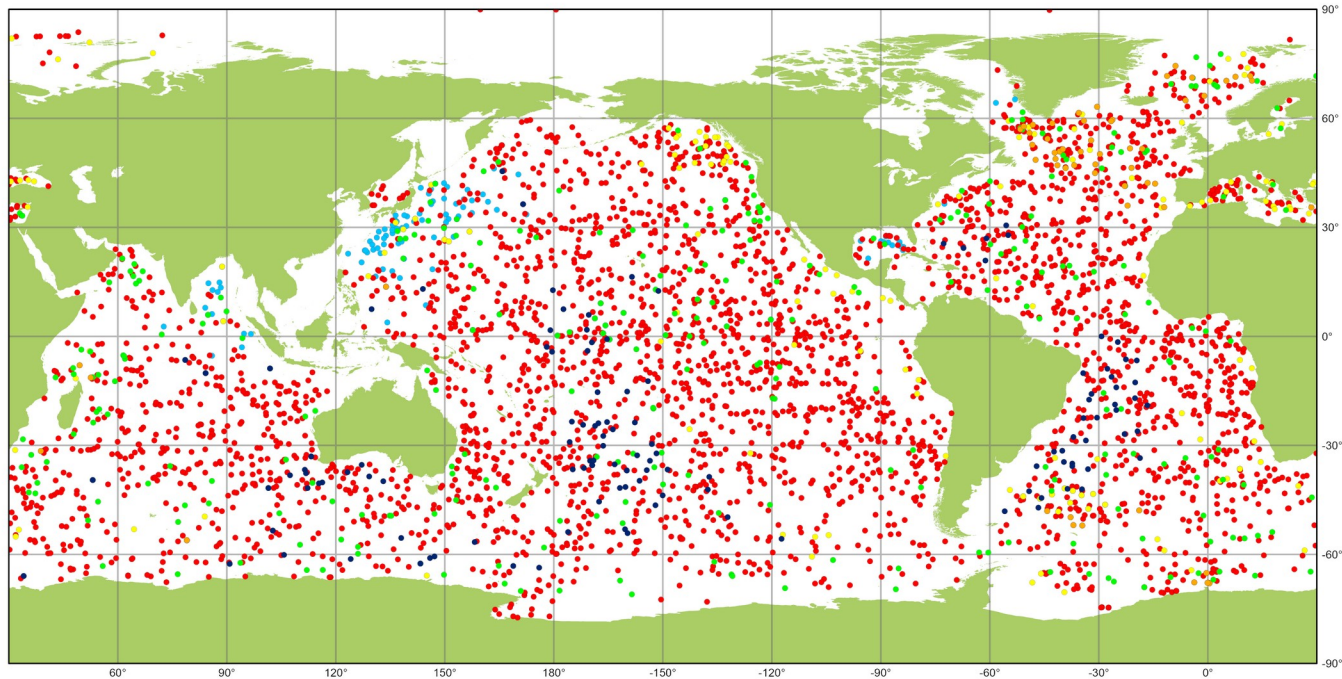


Un flotteur ARGO réalise des profils dans la colonne d'eau en modifiant sa flottabilité grâce à des ballasts à l'intérieur et à l'extérieur de l'engin.

Flotteurs -profileurs ARGO



Flotteurs -profileurs ARGO



Argo

Networks
3893 operational units

December 2022

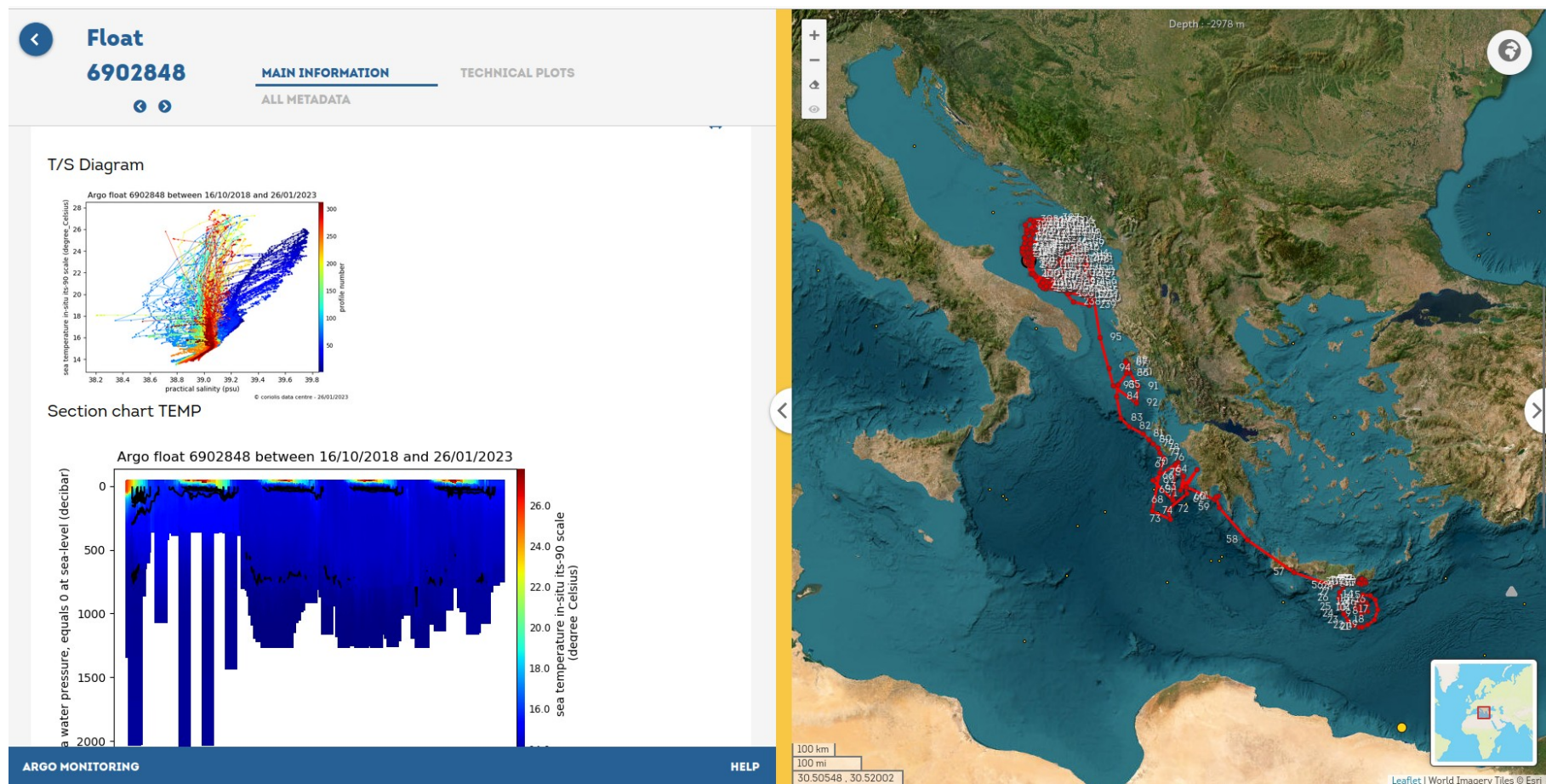


- Deep (TSO only) (58)
- Deep (182)
- BioGeoChemical (without TSO only) (295)
- Core + O2 (TSO) (142)
- Core (3181)
- Equivalent (150)



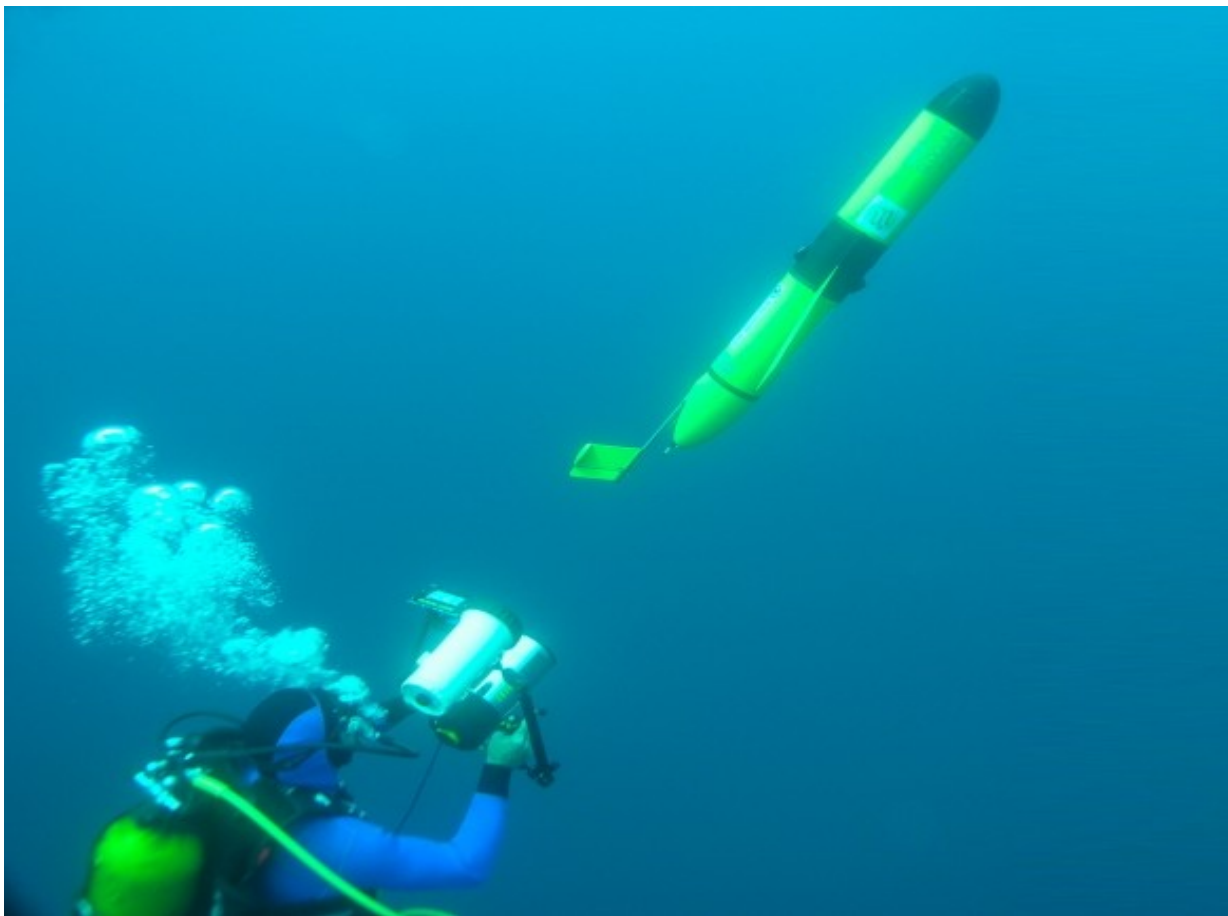
Generated by ocean-ops.org, 2023-01-01
Projection: Plate Carree (-150,0000)

Flotteurs -profileurs ARGO



<https://fleetmonitoring.euro-argo.eu>

Planeurs sous-marins



Le planeur sous-marin monte et descend dans un mouvement de dents de scie.

Ce déplacement se fait sans utiliser d'hélice, mais en changeant son volume.

Sa trajectoire est assurée par ses ailes et sa dérive

Planeurs sous-marins

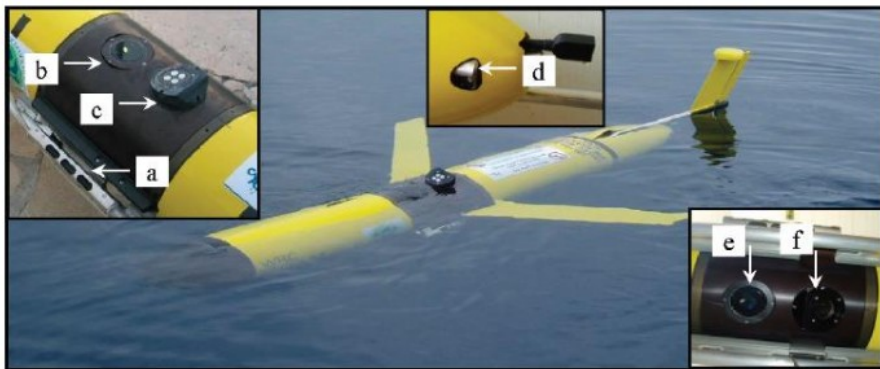
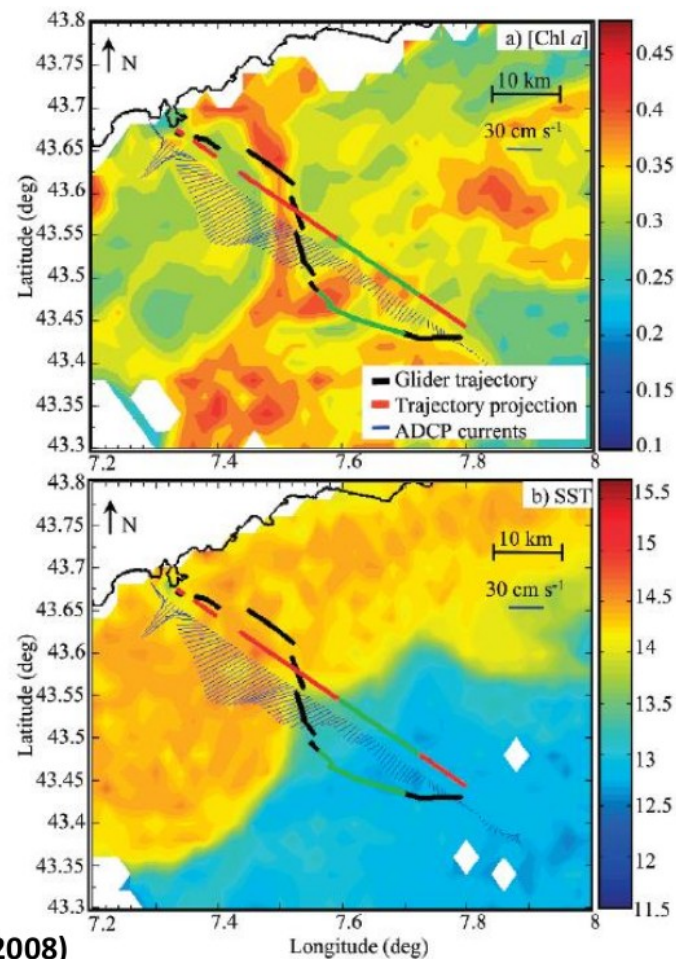
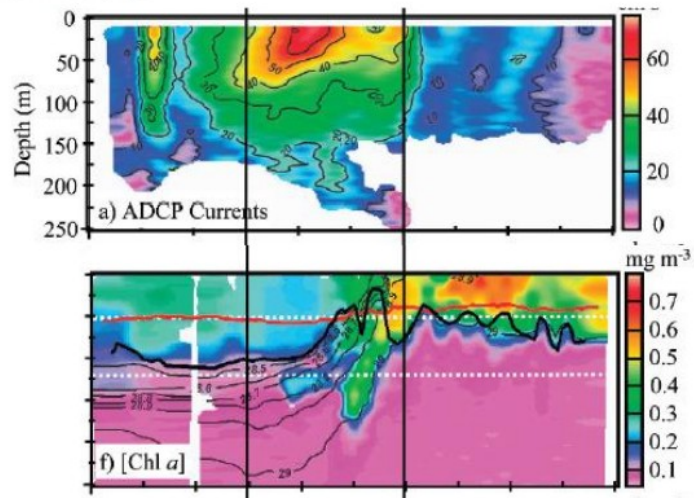


Fig. 1. Glider *Tournesol* and the associated sensors: (a) Seabird CTD cell (S,T); (b) Wetlabs BB2FLS (b_{bp} (660, 880 nm) and CDOM); (c) Satlantic OCR504I Radiometer (E_d); (d) Aanderaa 3830 optode (O_2); (e) Wetlabs BB2FLS (b_{bp} (470, 532) and Chl a); (f) Satlantic OCR504R Radiometer (L_u).



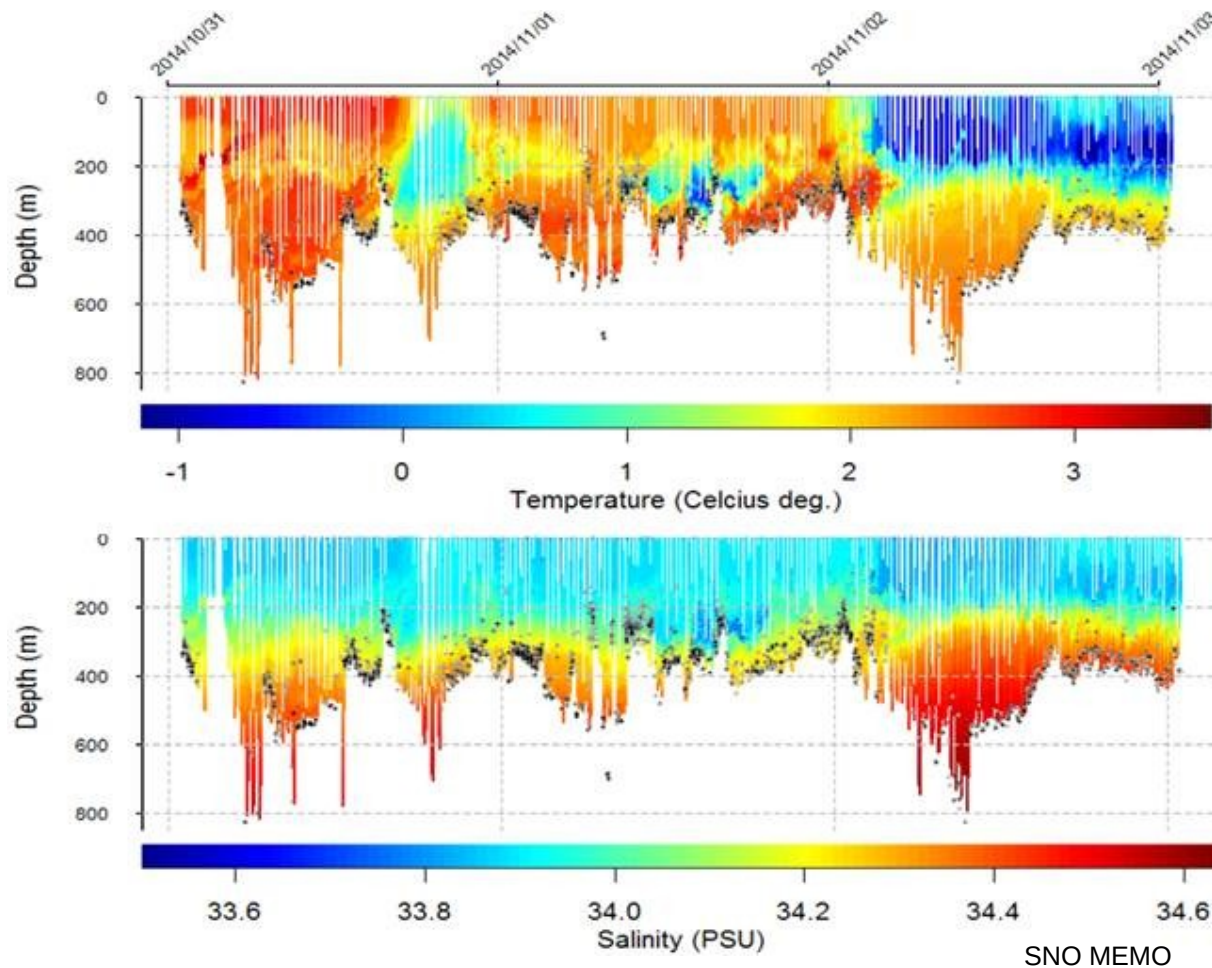
Niewiadomska et al. (2008)

Eléphants de mer « Océanographes »



SNO MEMO

Eléphants de mer « Océanographes »



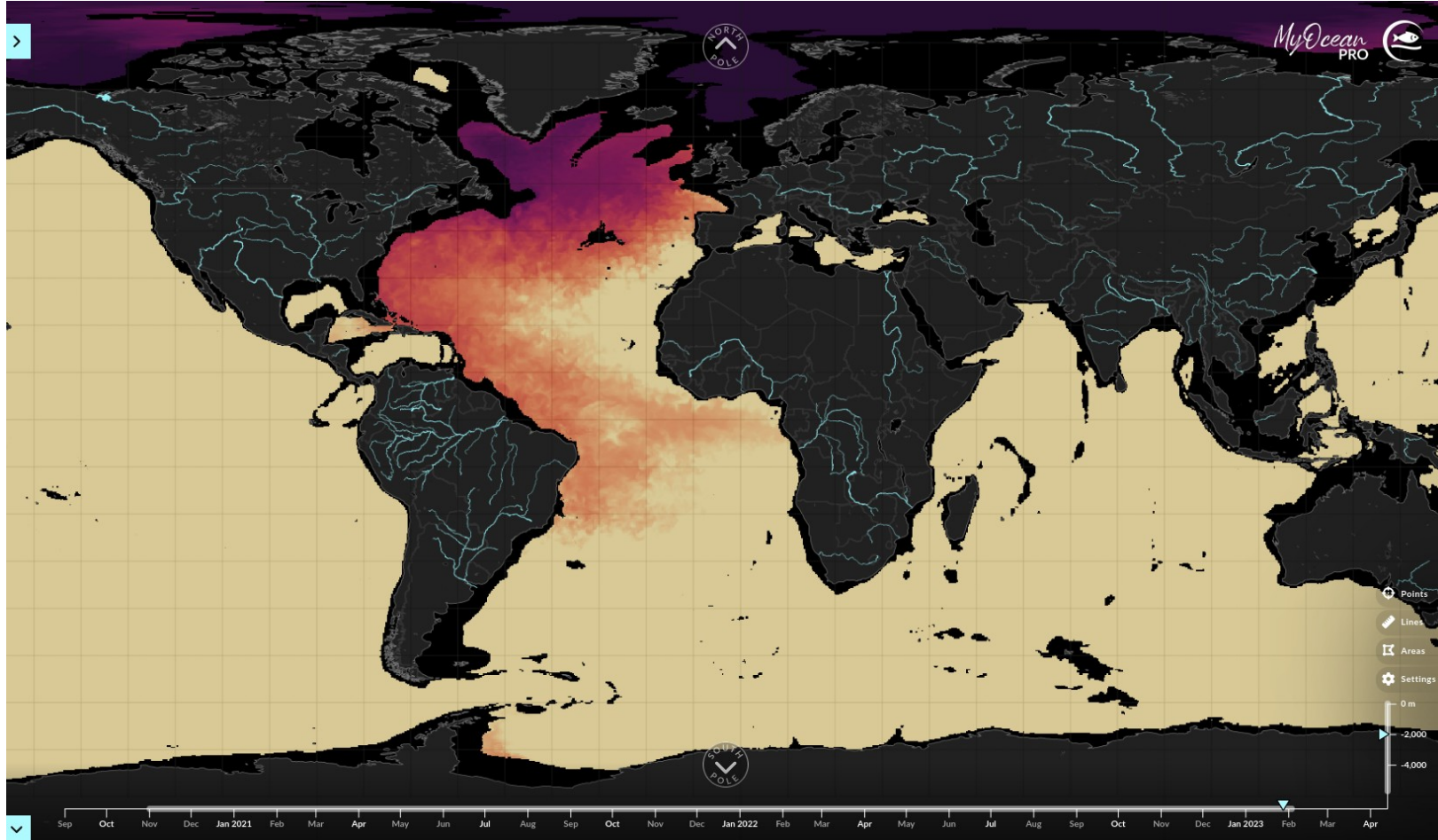
Océanographie opérationnelle

L'**Océanographie opérationnelle** est définie comme un ensemble d'activités de génération de produits et services fournissant des informations sur l'environnement marin.

Elle repose sur deux piliers principaux :

- La **surveillance**, qui se concentre sur les mesures de routine systématiques et à long terme des océans et leur ***diffusion rapides***
- La **prédiction**, basée sur des modèles océaniques pour générer des **prévisions immédiates** (décrivant l'état actuel de l'océan fourni par les analyses), **prévisions** (l'état futur de l'océan) ou **rétrospectives** (les états passés de l'océan, fournis par la réanalyse).

Océanographie opérationnelle



<https://marine.copernicus.eu/fr>

Conclusion

- Les océans sont les vecteurs de très importants transferts de matières.
- Les activités humaines laissent une empreinte globale sur la composition chimique des océans.
- Nous entrons dans « un nouveau paradigme » dans l'observation des océans.



Institut
océanographique
Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco

La « tomographie » de l'océan

Auteur : **Louis Legendre**

Professeur de l'université Pierre et Marie Curie

Président du Conseil scientifique de l'Institut océanographique, Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco