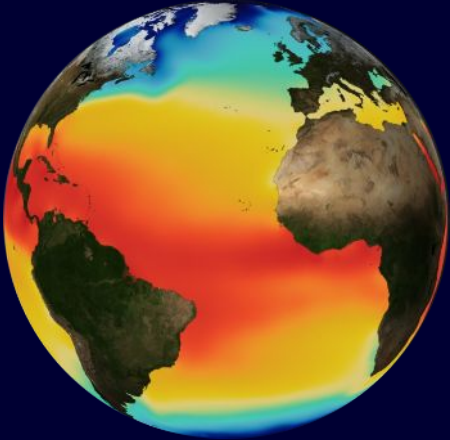




Océan et Océanographie, session 3



Biologie et écologie des Océans Partie 1

Jean-Philippe Labat, 2024



Biologie et écologie des Océans Partie 1

- ♦ Diversité biologique dans l'océan.
- ♦ Pelagos et benthos.
- ♦ Pelagos : plancton et necton.
 - × Diversité biologique du plancton.
 - × Phytoplancton ou Plancton "*végétal*".
 - × Zooplancton ou plancton animal.
- ♦ Domaine pélagique, stratégie trophique et taille.
- ♦ Fonctionnement du domaine pélagique.
- ♦ Fonctionnement des systèmes pélagiques tropicaux.
- ♦ Fonctionnement de zones d'Upwelling.
 - × Upwelling du courant du Benguela.
 - × Upwelling du courant de Humboldt.
 - × ENSO, El Niño Southern Oscillation.
- ♦ Dynamique de l'océan à mésoéchelle.
- ♦ La pompe biologique.

Le paradoxe de la diversité biologique dans l'océan

Si on considère l'océan en volume, il représente plus de 90 % du volume offert à la vie sur la Terre

Dans les Muséums du monde entier, un peu plus de 2 millions d'espèces identifiées, moins de 250 000 vivent dans l'océan.

L'océan n'abrite aujourd'hui que 13 % des espèces connues ?

Si l'océan contient **moins d'espèces**, en revanche il abrite beaucoup **plus de groupes et de phylums** : pour les seuls animaux, sur les 31 phylums connus aujourd'hui, 12 ne l'ont jamais quitté et s'y trouvent toujours.

La vie a tout d'abord été exclusivement marine jusque vers 440 millions d'années (pour la vie «métazoaire élaborée») puis a explosé en nombre d'espèces sur les continents vers 110 millions d'années.

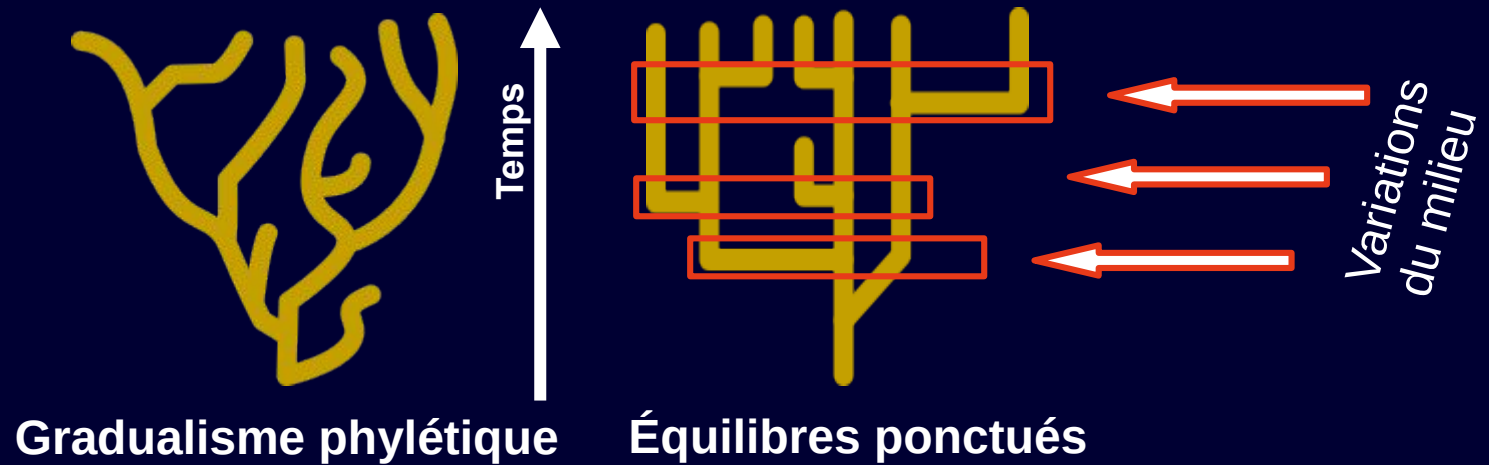
Gilles BOEUF, Président du Muséum national d'histoire naturelle, Professeur à l'Université Pierre & Marie Curie, Professeur invité au Collège de France.

Boeuf, G. Marine biodiversity characteristics. Comptes Rendus Biologies 334, 2011.

Pour mémoire : 7 rangs taxonomiques : Règne / embranchement (ou phylum) / Classe / Ordre / Famille / Genre / Espèce.

Le paradoxe de la diversité biologique : une explication

Le vivant réagit aux divers changements extérieurs par la spéciation : plus le milieu varie, plus les espèces se diversifient et cela, depuis toujours (la **théorie des «équilibres ponctués»** de Gould et Eldredge, 1993).



Stabilité, connectivité = changements limités dans l'océan

Les plus faibles variations des conditions dans l'océan ne favorisent donc pas l'apparition d'espèces nouvelles.

Un corollaire : la durée de vie des espèces, beaucoup plus longue en mer (7-8 Ma dans les séries fossiles contre 2-3 sur les continents).

- Les océans ont des populations et des communautés très stables et souvent ancestrales, principalement en domaine profond.
- Toutes les mers sont interconnectées et, en théorie, tous les organismes pourraient migrer vers n'importe quel autre endroit de la mer.
- Les milieux marins sont plus homogènes et stables, et sont moins inégaux. Le transport par l'eau de mer des cellules ou des organismes (plancton, gamètes, larves...) est très différent de celui de l'air.

Pelagos et benthos



Le **Pelagos** est l'ensemble des organismes vivant dans la masse d'eau
Le **Benthos** est l'ensemble des organismes vivant sur le fond.

Organismes et grands systèmes pélagiques

Pour le pelagos
L'ambiguïté : plancton et necton ?

Le plancton est l'ensemble des organismes vivant dans la masse d'eau, le plus souvent en suspension et apparemment passivement.

Christian Andreas Victor Hensen, zoologiste allemand, 1887.

Étymologie de « Plancton » : qui est errant, vagabond, du grec ancien : ~~ε~~ instable.

Plancton
Stricto sensu

Plancton
Lato sensu

Le necton est un ensemble d'organismes vivant dans la masse d'eau et ayant une capacité de nage telle qu'ils peuvent se déplacer.

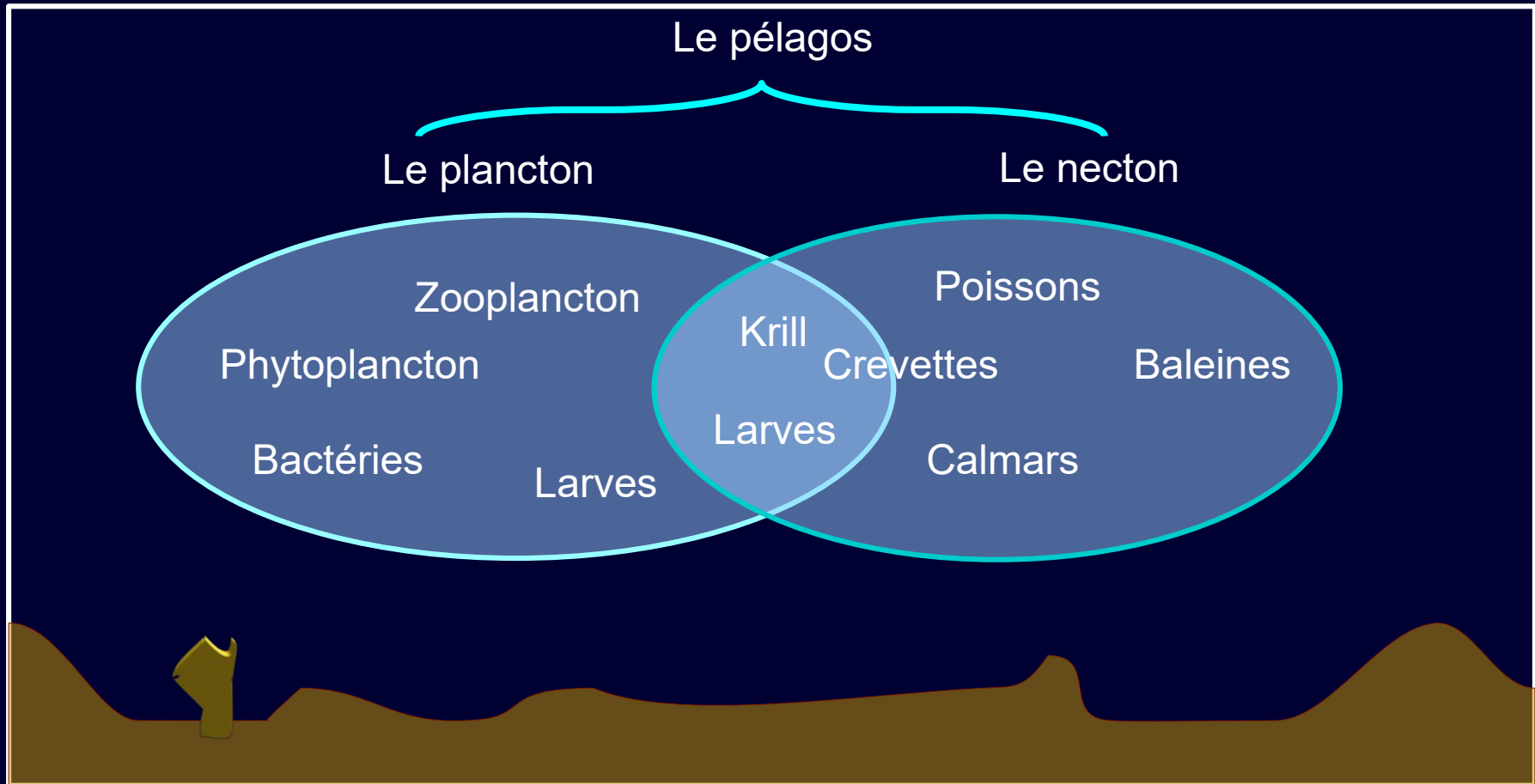
Ernst Haeckel, zoologiste allemand, 1890.

Étymologie du grec ancien «qui nage»

Continuum du critère déplacement



Pelagos : plancton et necton

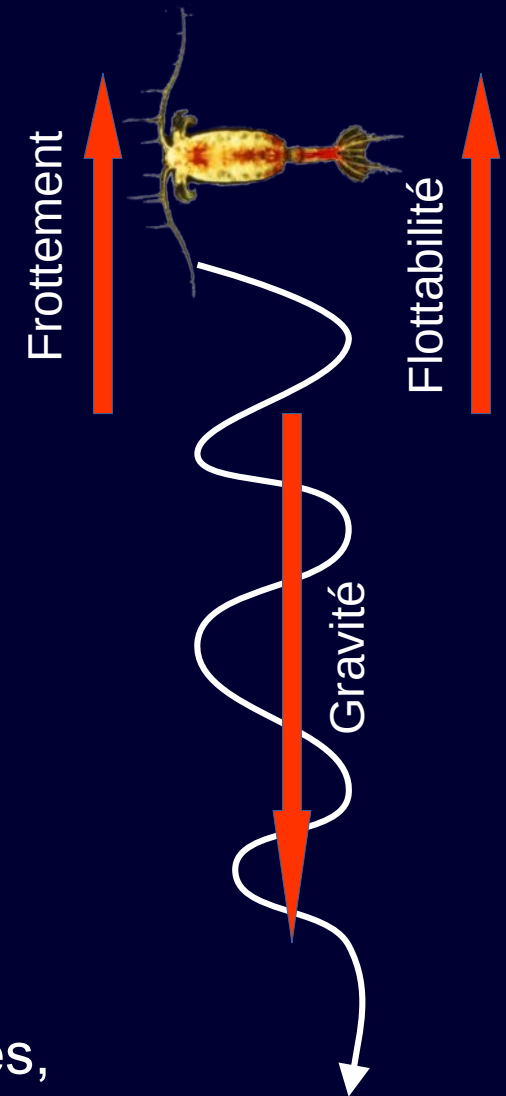


Le **plancton** est l'ensemble des organismes vivant dans la masse d'eau, le plus souvent en suspension et apparemment passivement. Il se différencie du **necton**, capable de se déplacer activement.

Adaptation à la vie pélagique

Lutter contre la « chute »

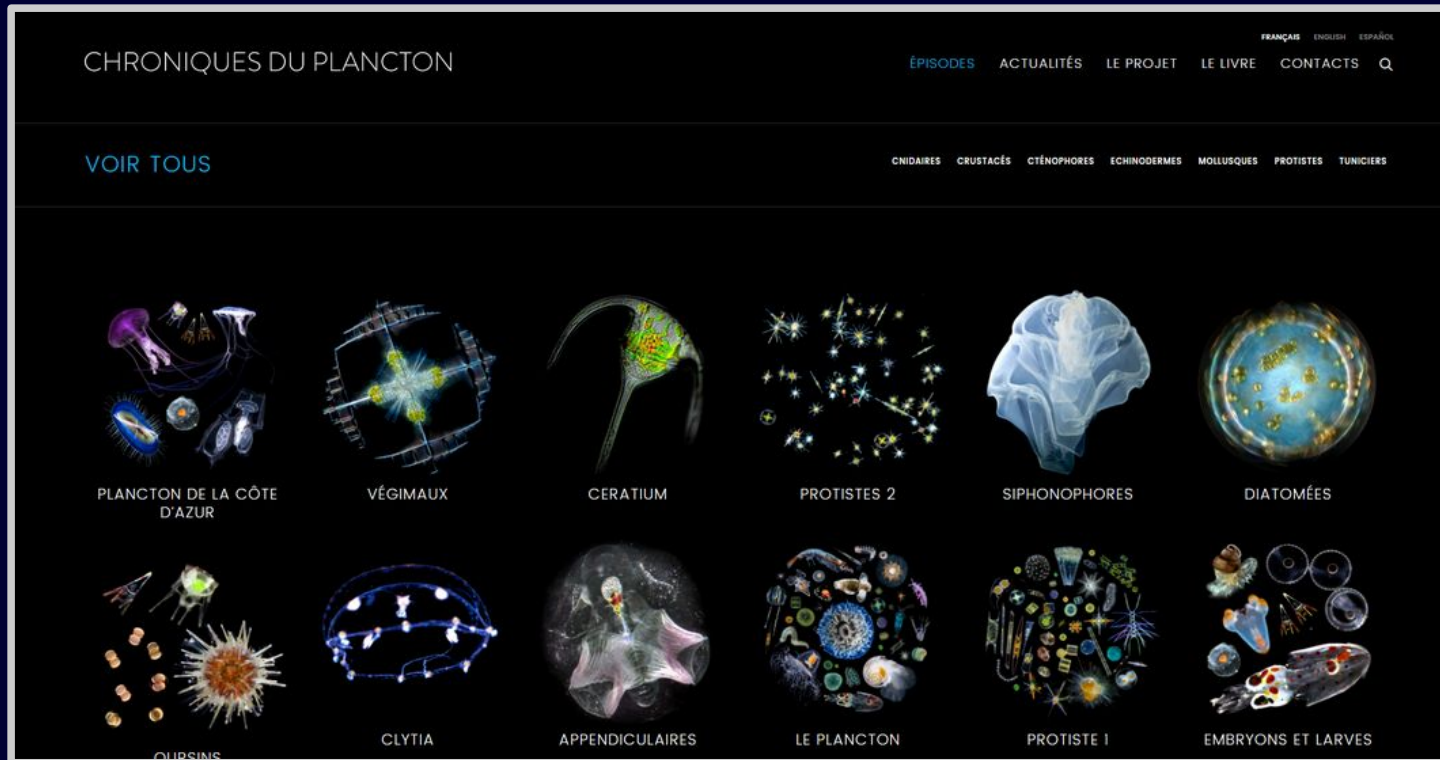
- ✓ Augmenter les forces de frottement :
 - ✓ Extensions, appendices foliacés, épines, ailettes,
 - ✓ Forme « parachute »,
 - ✓ Aplatissement
- ✓ Densité proche de celle de l'eau :
 - ✓ Flotteurs,
 - ✓ Forte teneur en eau,
 - ✓ Squelette réduit,
 - ✓ Accumulation de gouttes lipidiques.
- ✓ Éviter les prédateurs dans un milieu transparent :
 - ✓ Transparence du corps, parties vitales regroupées,
 - ✓ Bioluminescence (masquer la fuite, lumière),
 - ✓ Migrations verticales nyctémérales.



Diversité biologique du plancton

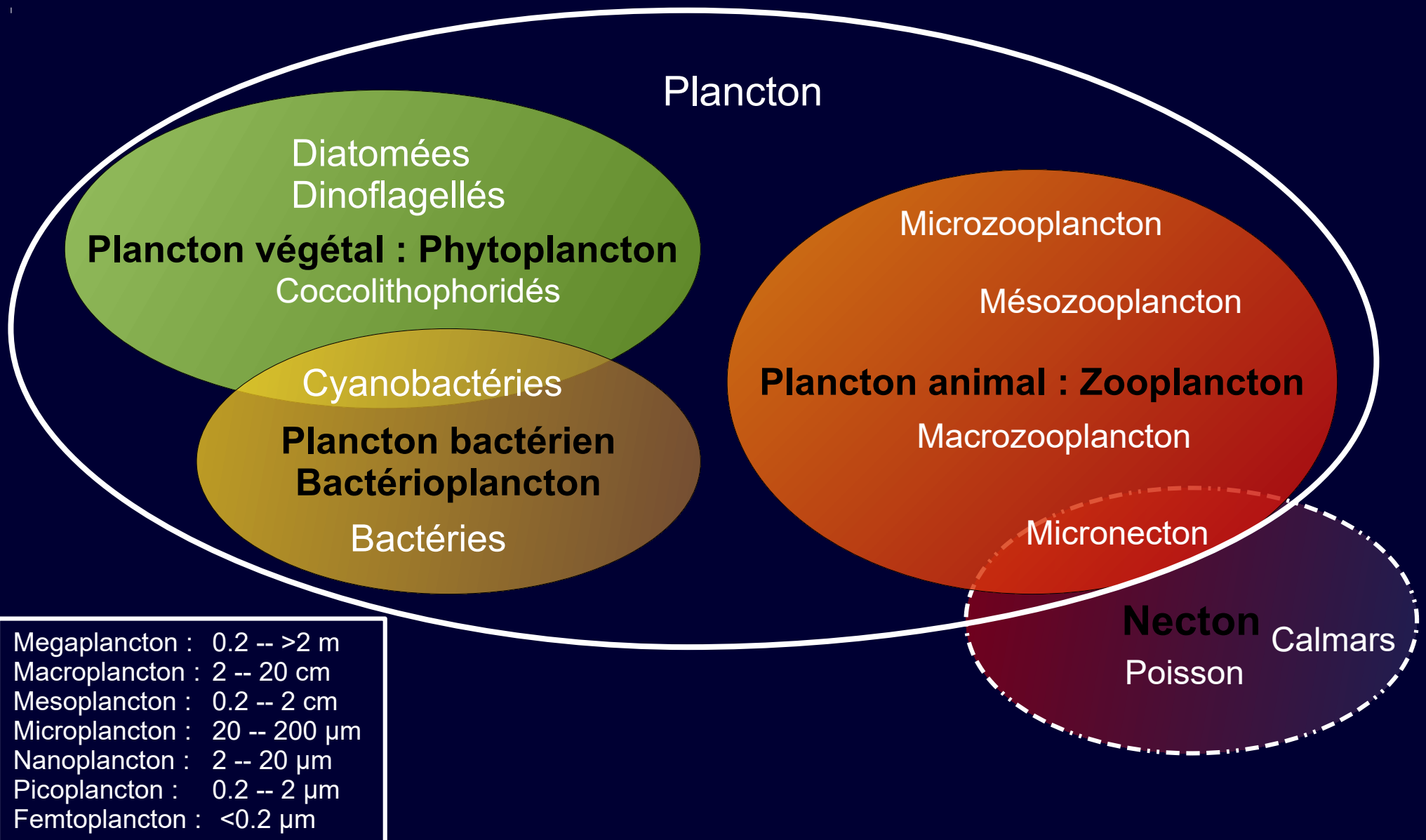
Les « Chroniques du plancton »

Les vidéos suivantes viennent des « Chroniques du plancton »
<http://planktonchronicles.org/fr/>



Les Chroniques du Plancton réalisées par Christian Sardet (CNRS), Sharif Mirshak et Noé Sardet (Parafilms) dans le cadre de l'Expédition Tara Océans et de l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer (CNRS / UPMC).

Diversité biologique du plancton

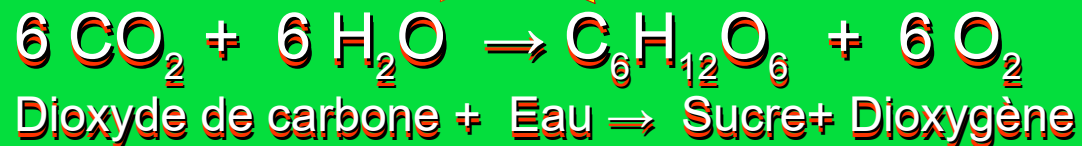
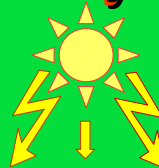


Phytoplancton ou Plancton "végétal "

Définition simple et pratique mais vague taxonomiquement

Une seule cellule, non fixée, très peu mobile, photosynthétique *

Photosynthèse

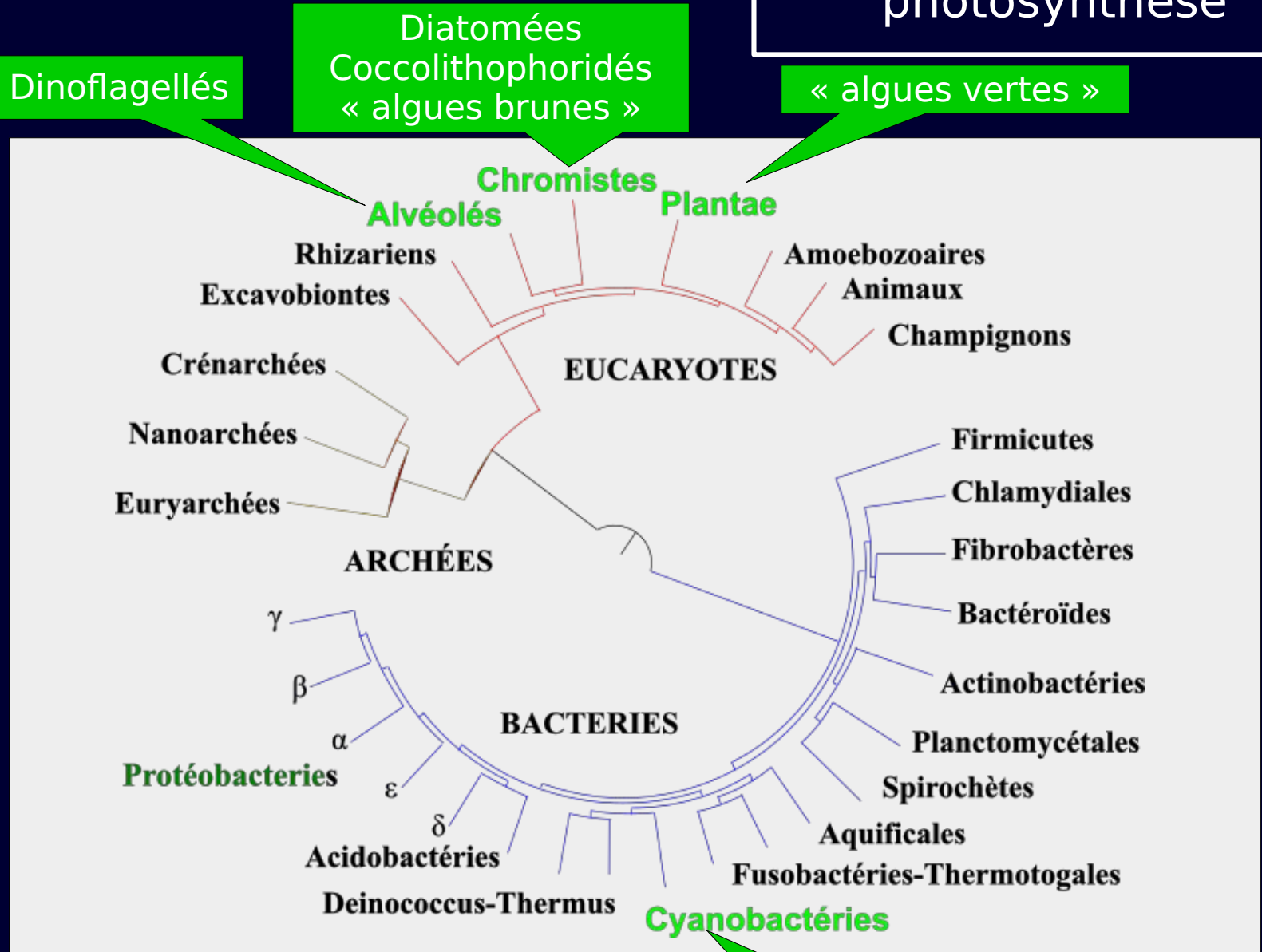


Production primaire pélagique

(* Définition simple et pratique mais vague taxonomiquement)

Une seule cellule, non fixée, très peu mobile, photosynthétique :
Définition simple et pratique mais vague taxonomiquement

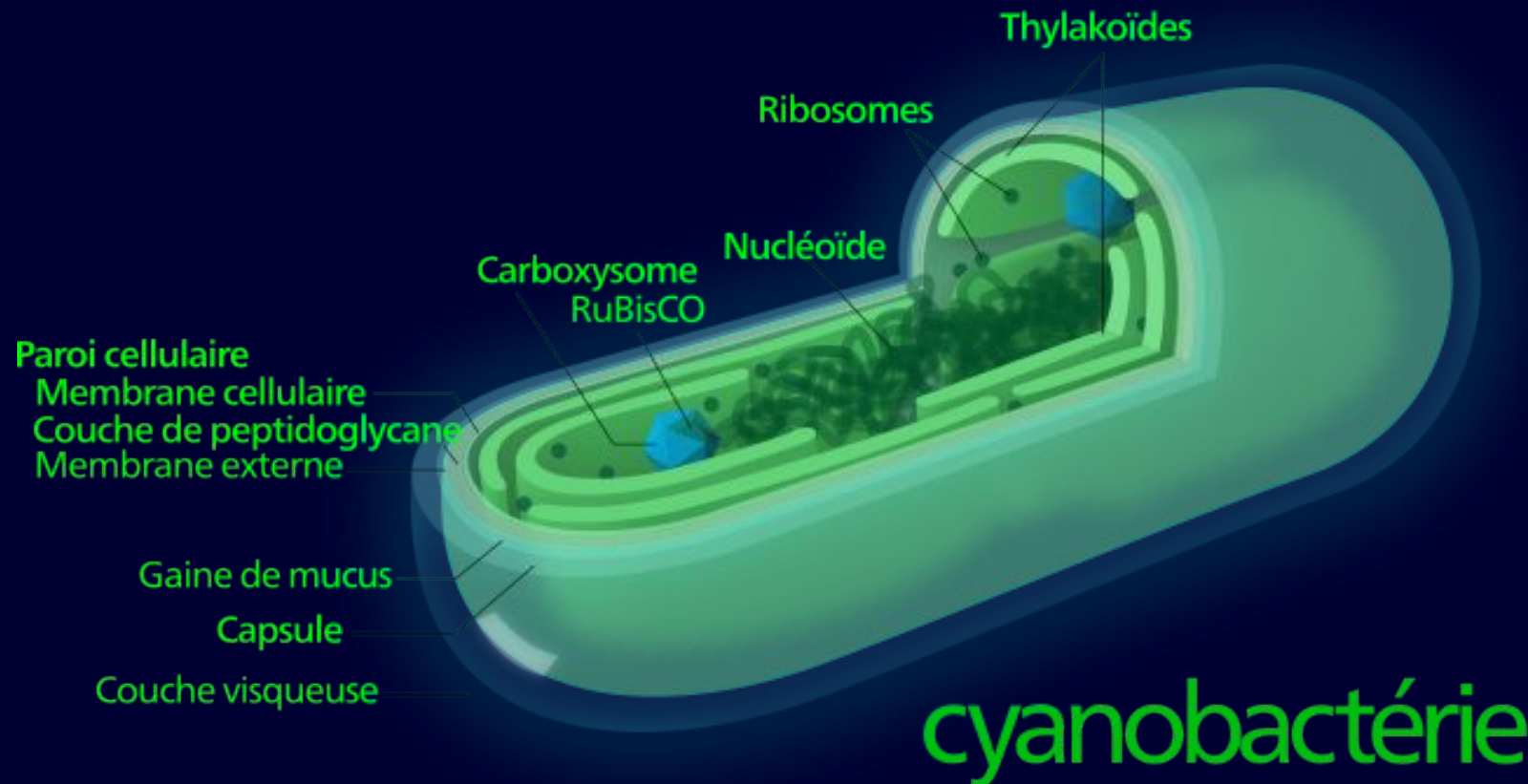
Phytoplancton et photosynthèse



Cyanobactéries

Cyanobactéries

Bactérioplancton, procaryotes, mixotrophes sans noyau véritable, ni plaste



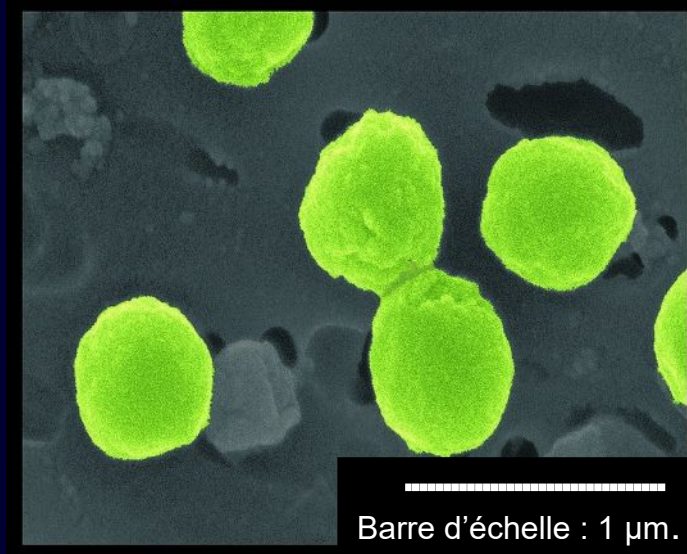
Kelvinsong [CC BY-SA 3.0]

Thylakoïdes : sacs contenant les organites photosynthétiques qui assurent la photosynthèse, la respiration et la fixation de l'azote, la diazotrophie (chez certaines espèces).

Nucléoïde : situé au centre de la cellule assure des fonctions semblables à celle d'un noyau et contient l'ADN.

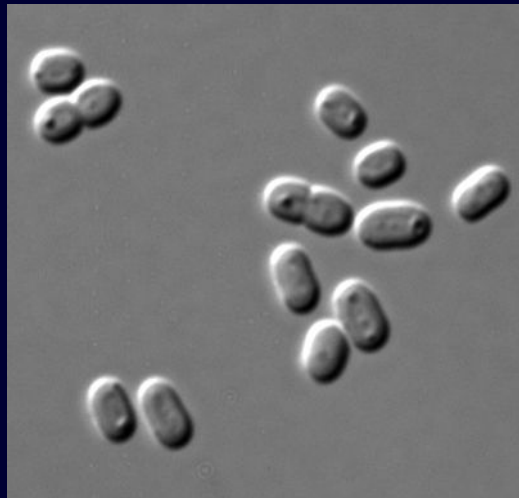
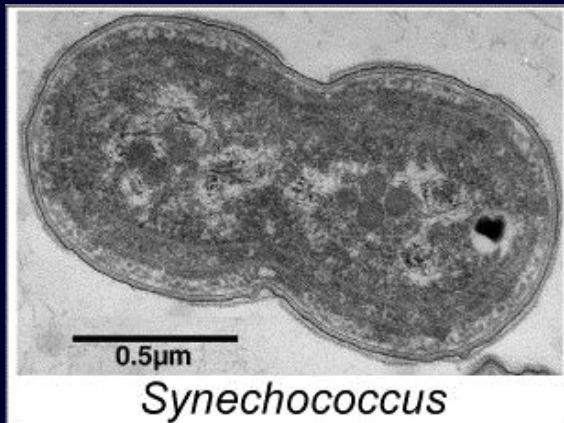
Cyanobactéries : *Prochlorococcus* et *Synechococcus*

Prochlorococcus

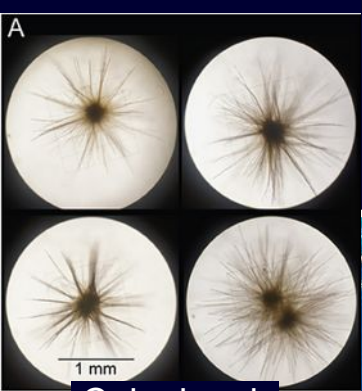


Cyanobactéries marines photosynthétiques, classées parmi les picoprocaryotes.
Taille 0,6 μm . Densités --> 100 000 cellules/ml.
5% environ de la photosynthèse mondiale.

Synechococcus

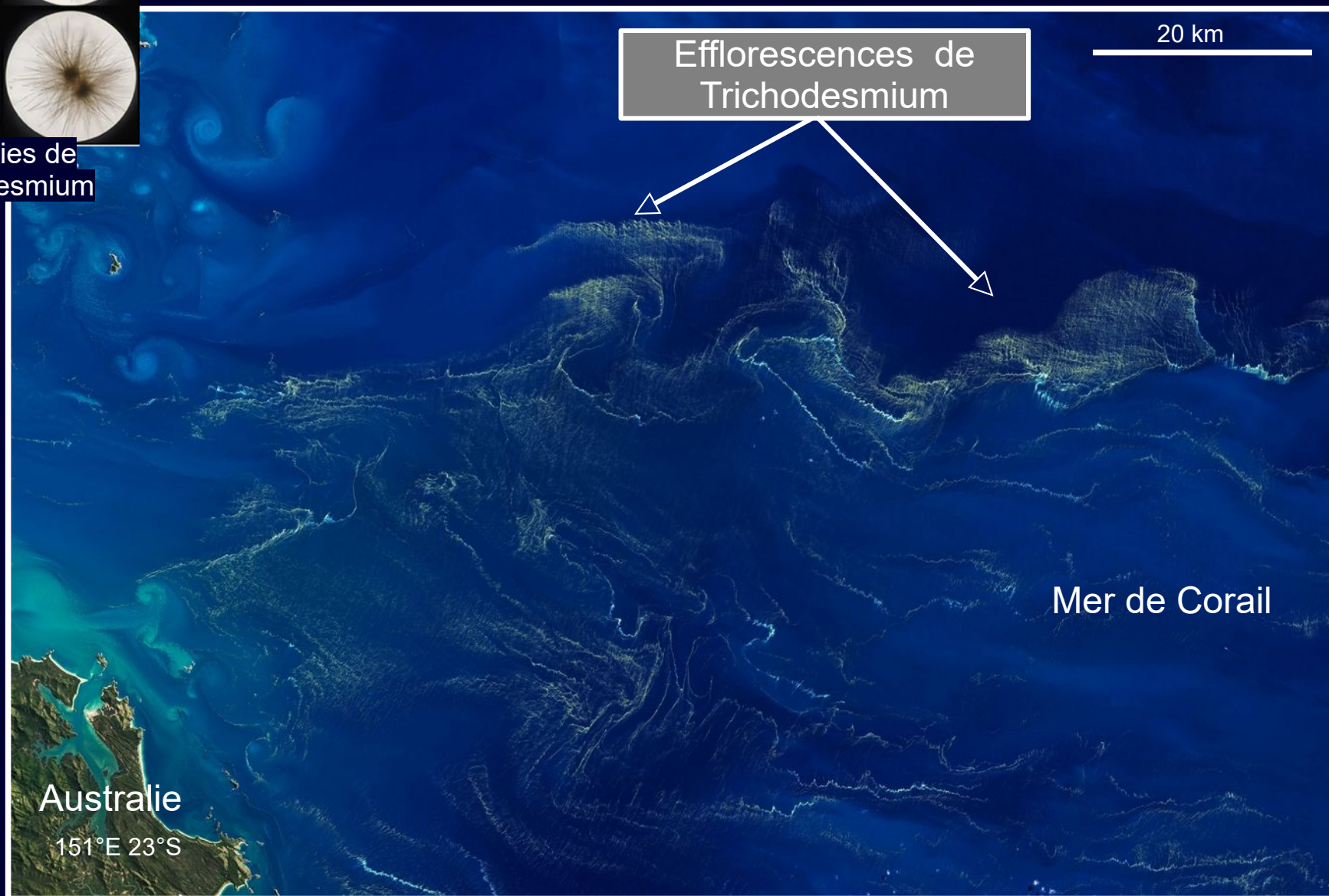


Cyanobactérie nanoplanctonique.
Très abondante dans le milieu marin
(--> 200 000 cellules/ml).
Avec *Prochlorococcus*, elle domine
dans les zones oligotrophes de
l'océan .



Colonies de
Trichodesmium

Cyanobactéries : *Trichodesmium*



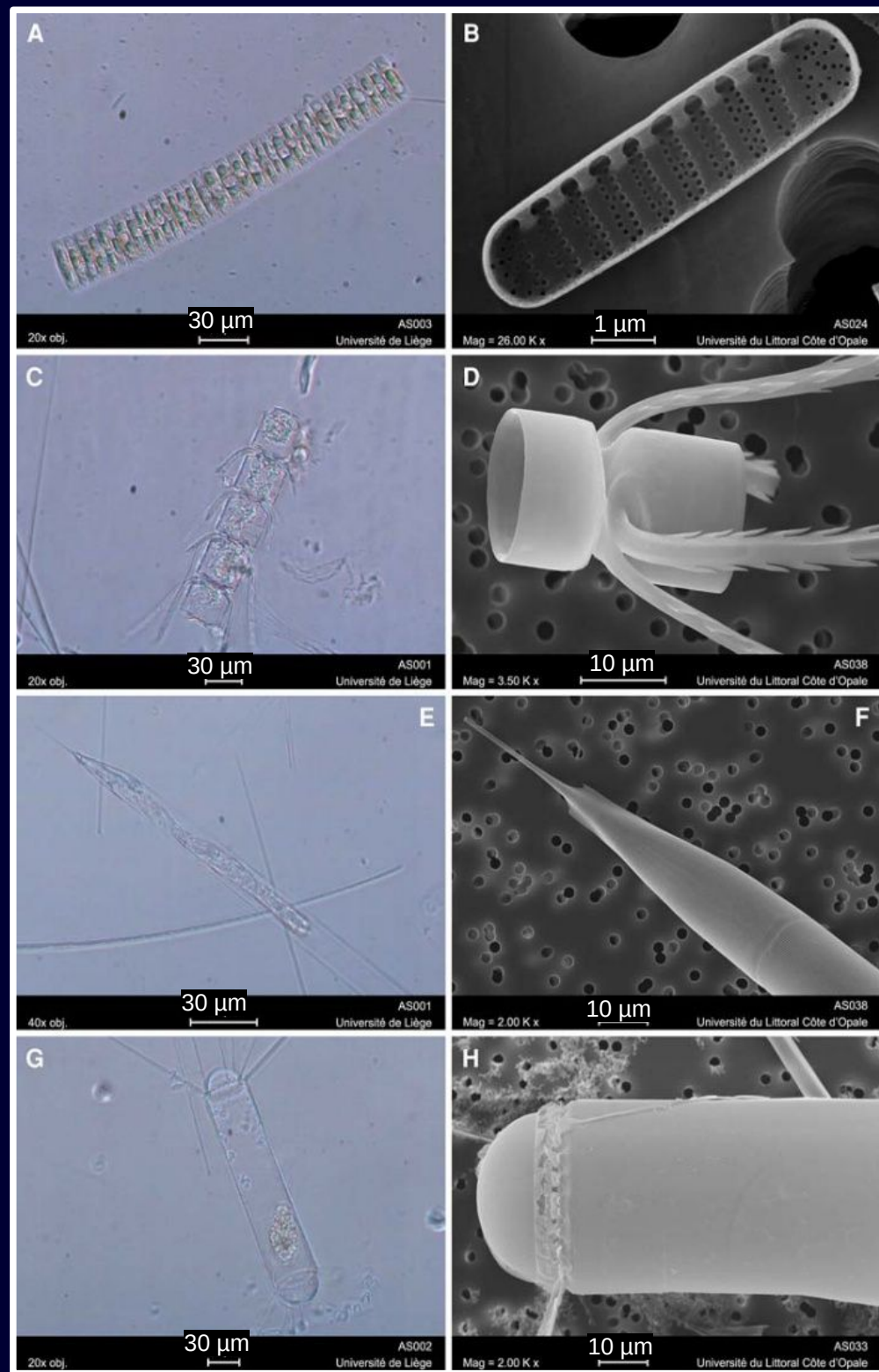
Efflorescence (bloom) de la cyanobactérie diazotrophe *Trichodesmium* spp

Diatomées

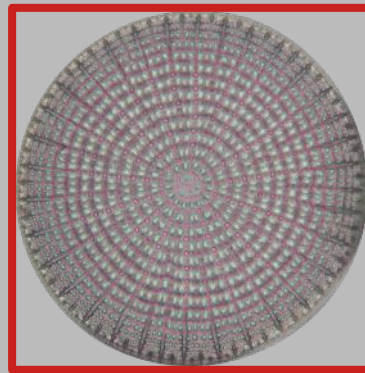
Phytoplancton, eucaryote, unicellulaire
squelette externe siliceux



a, b *Fragilariopsis* spp.
c, d *Chaetoceros criophilus*
e, f *Rhizosolenia* spp.
g, h *Corethron pennatum*



Diatomées

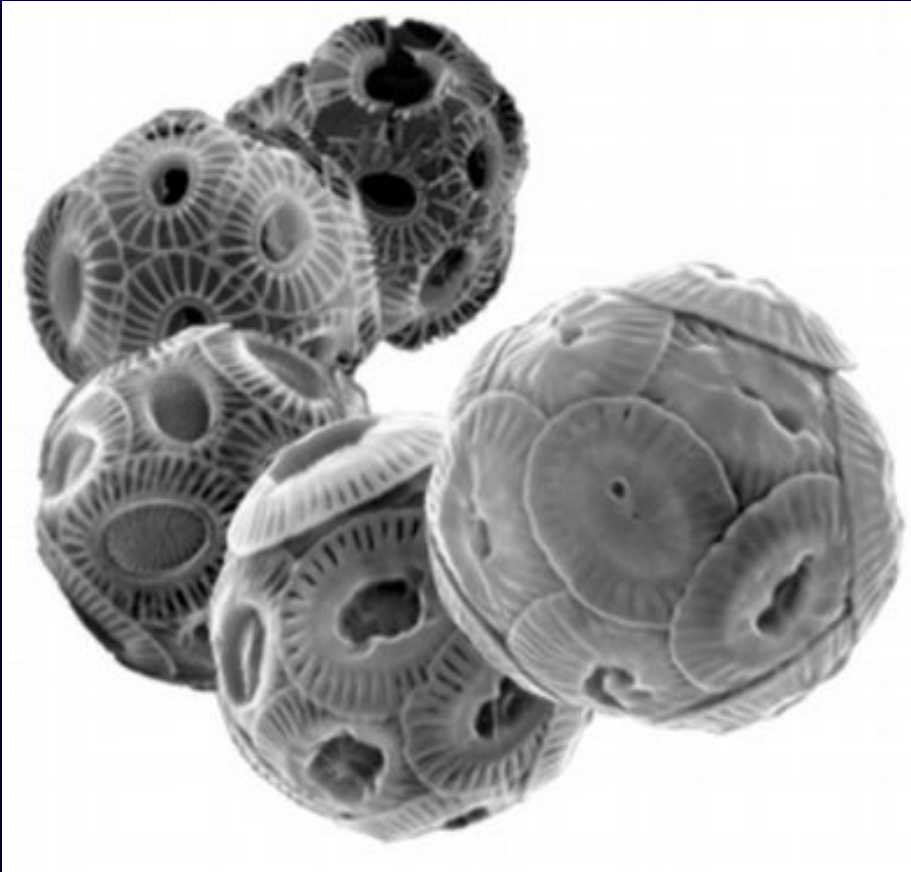


<https://planktonchronicles.org/fr/portfolio/diatomees-maisons-de-verre/>

Algues brunes unicellulaires à enveloppe siliceuse

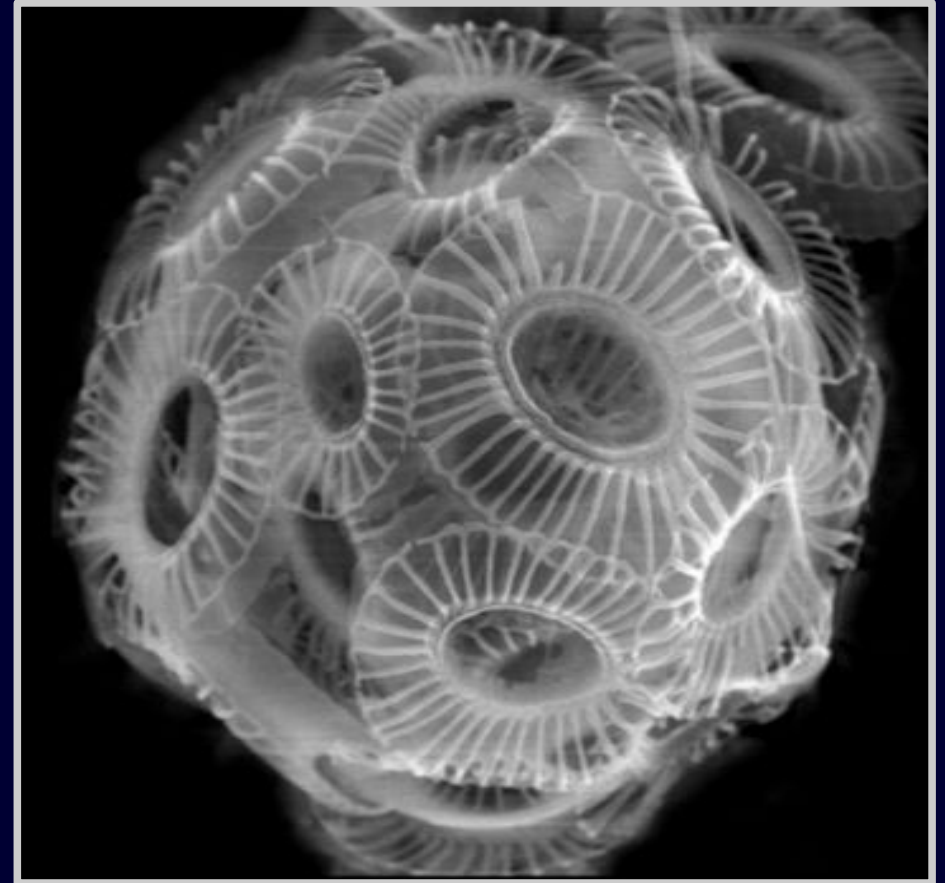
Vidéo :Chroniques du Plancton
Christian SARDET
<http://planktonchronicles.org/fr/>

Coccolithophoridés



© Luc Beaufort CNRS/CEREGE

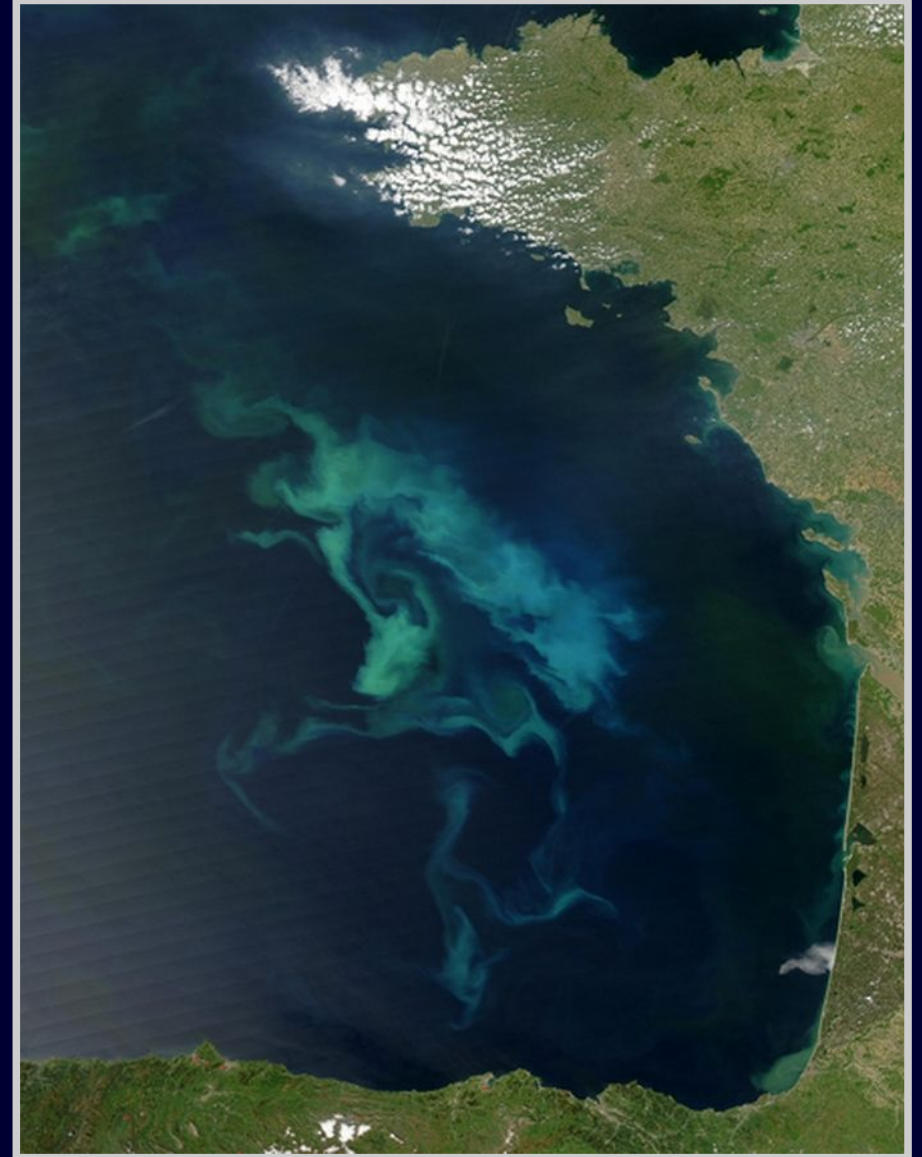
Emiliana huxleyi



© INSU-CNRS, Luc Beaufort

Coccolithophoridés
Phytoplancton, eucaryote, unicellulaire
de 5 à 50 microns, enveloppe en carbonate de calcium.

« Bloom » de Coccolithophoridés



Dinoflagellés

Organismes eucaryotes unicellulaires aux comportements alimentaires variés : photosynthétiques / hétérotrophes / mixotrophes



Ceratium pentagonum



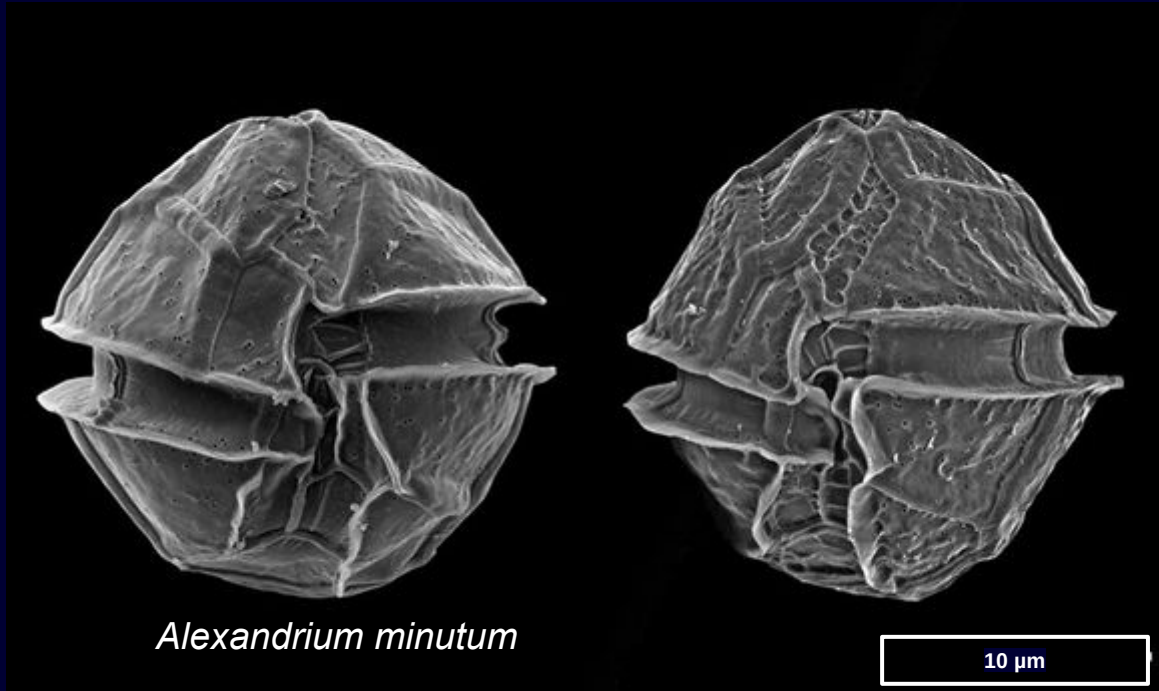
Ceratium horridum



Ceratium concilians

L'analyse des pigments révèle la présence de chlorophylle *a* et *c* ainsi que de caroténoïdes divers

Dinoflagellés et toxicité



Dinophysis, *Alexandrium* producteurs de toxines diarrhéiques, paralysantes et amnésiantes.

Ostreopsis danger potentiel pour les usagers de la mer, produit la palytoxine et des ovatoxines en aérosols dans l'air au risque de provoquer des irritations respiratoires



Ostreopsis

Diversité biologique du plancton

Zooplancton ou plancton animal

1 - Le microzooplancton

Protozoaires unicellulaires hétérotrophes

Microzooplancton

Tintinnide Radiolaire

Squelette à base de dioxyde
de silicium SiO_2

Zygocircus sp
Radiolaire



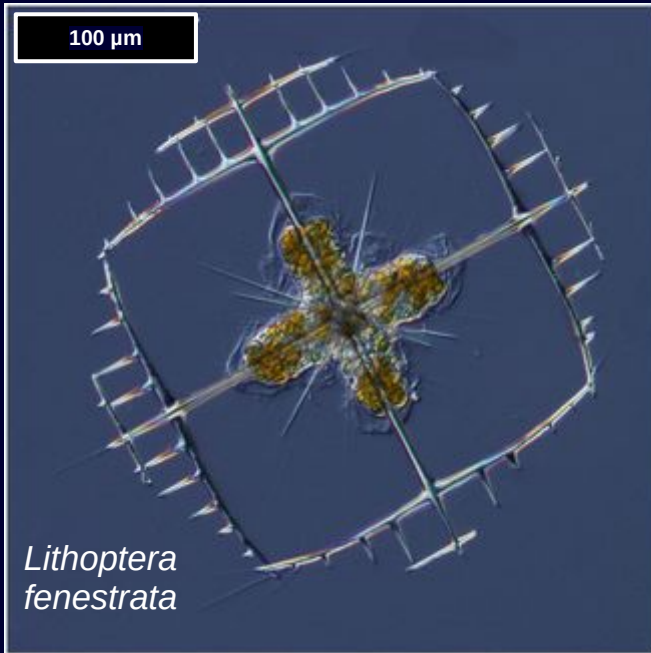
Cyttarocylys
Tintinnide



Cyttarocylys ampulla
Tintinnide

Acanthaires

Microzooplancton

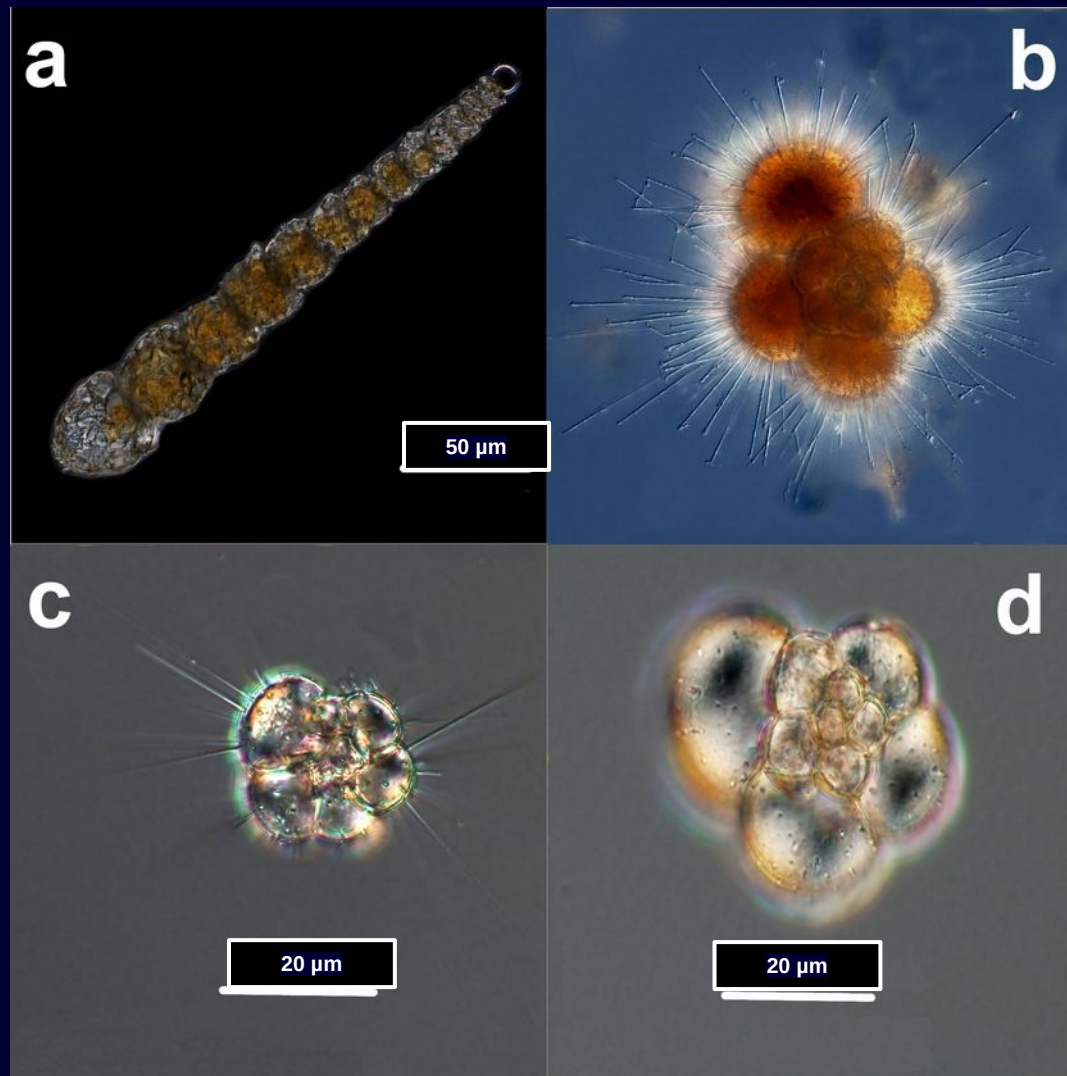


Squelette essentiellement constitué de matière organique et sulfate de strontium.



Foraminifère

La composition des squelettes est variée : organique, agglutinée, carbonatée et siliceuse.



a: Foraminifère benthique de l'Arctique : *Leptohalysis catella*

b: Foraminifère de type Globigerinid.

c: Foraminifère de 600m de profondeur. Méditerranée (Mer Egée)

d: Coquille de Foraminifère de type Globigerinid. Méditerranée (Mer Egée)

Diversité biologique du plancton

Le plancton animal

2 - Le métazooplancton*

On y rencontre entre autres:

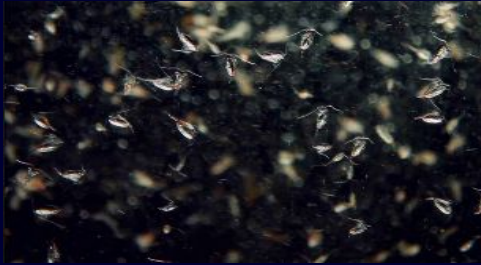
- les cnidaires
- les cténares
- les vers : annélides polychètes et chétognathes.
- les crustacés : cladocères, copépodes et euphausiacées.
- les mollusques
- les tuniciers : les salpes et les appendiculaires

...

* Plancton composé de métazoaires (animaux pluricellulaires)

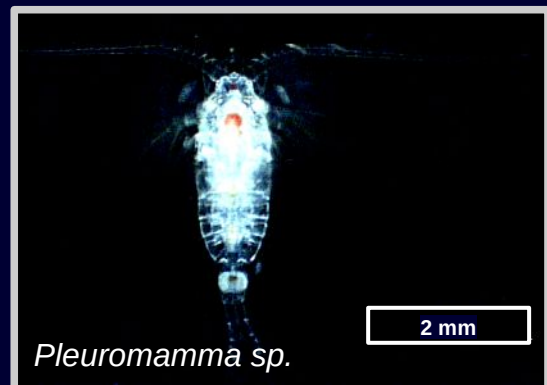
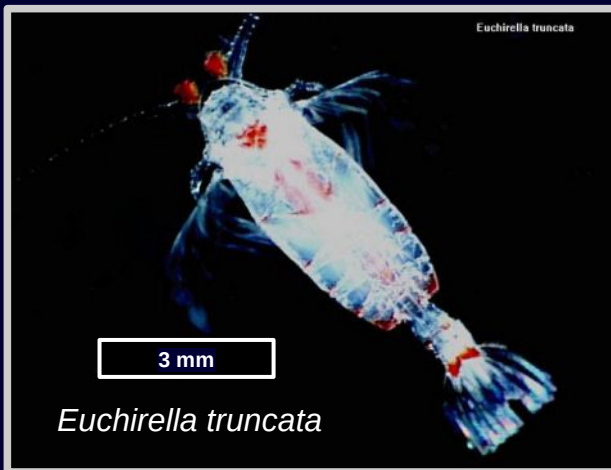
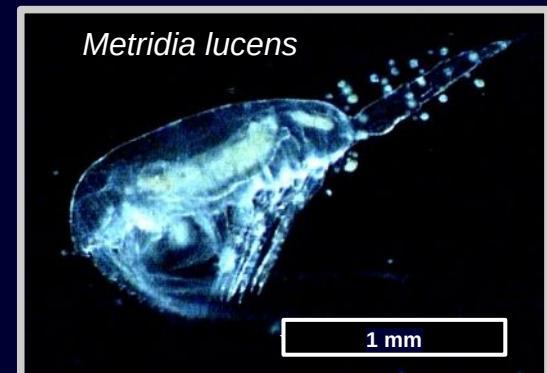
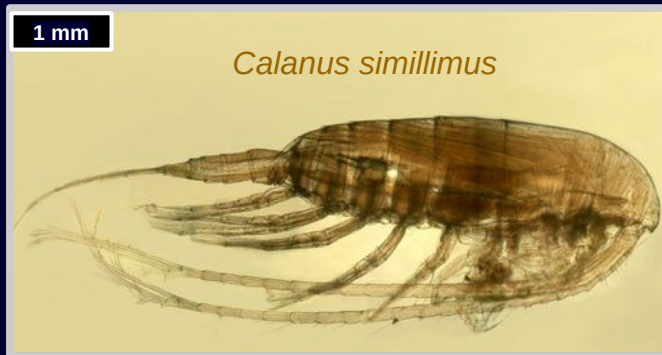
Crustacés du plancton

Copépodes



Ce sont des crustacés. Les adultes ne mesurent le plus souvent qu'un ou deux millimètres (entre 0,2 mm et 10 mm).

Ils sont l'une des principales composantes du zooplancton. Ils représentent rarement moins de 60 % et parfois plus de 80 % de la biomasse zooplanctonique.



<http://copepodes.obs-banyuls.fr/>

<http://www.obs-vlfr.fr/~gaspari/copepodes/>

Amphipodes : Phronimes



1 cm

Phronime : Crustacé amphipode hyperien

Phronimes



<https://planktonchronicles.org/fr/portfolio/phronimes-monstres-des-tonneaux/>

Crustacé amphipode hyperien

Euphausiacées

Crustacé, Malacostracé, Eucarida



Euphausia superba



Photo : David Luquet

Elles font partie du micronecton, elles ont des capacités de déplacement importantes notamment les adultes.

Elles sont souvent appelées « Krill » quand elles se rassemblent en banc et sont la nourriture entre autres des cétacés.



Manchot Adélie



Rorqual

Macroplancton « gélatineux »

★ Herbivores, filtreurs phytophages

● Salpes



★ Omnivores

● Mollusques Ptéropodes



★ Les carnivores

● Méduses

● Siphonophores

● Cténophores



Les Méduses



<https://planktonchronicles.org/fr/portfolio/pelagia-meduses-redoutees/>

Embranchement des Cnidaria, carnivores

Cténophores



<https://planktonchronicles.org/fr/portfolio/ctenophores-orgie-de-couleurs/>

Embranchement Ctenophora , carnivores

Vidéo :Chroniques du Plancton
Christian SARDET
<http://planktonchronicles.org/fr/>

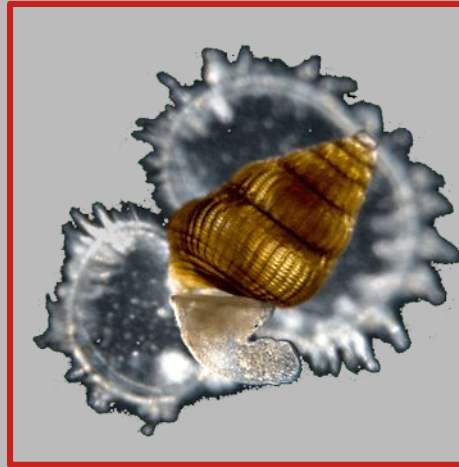
Salpes



<https://planktonchronicles.org/fr/portfolio/salpes-la-vie-enchaine/>

Animaux chordés tuniciers, gélatineux, filtreurs phytophages

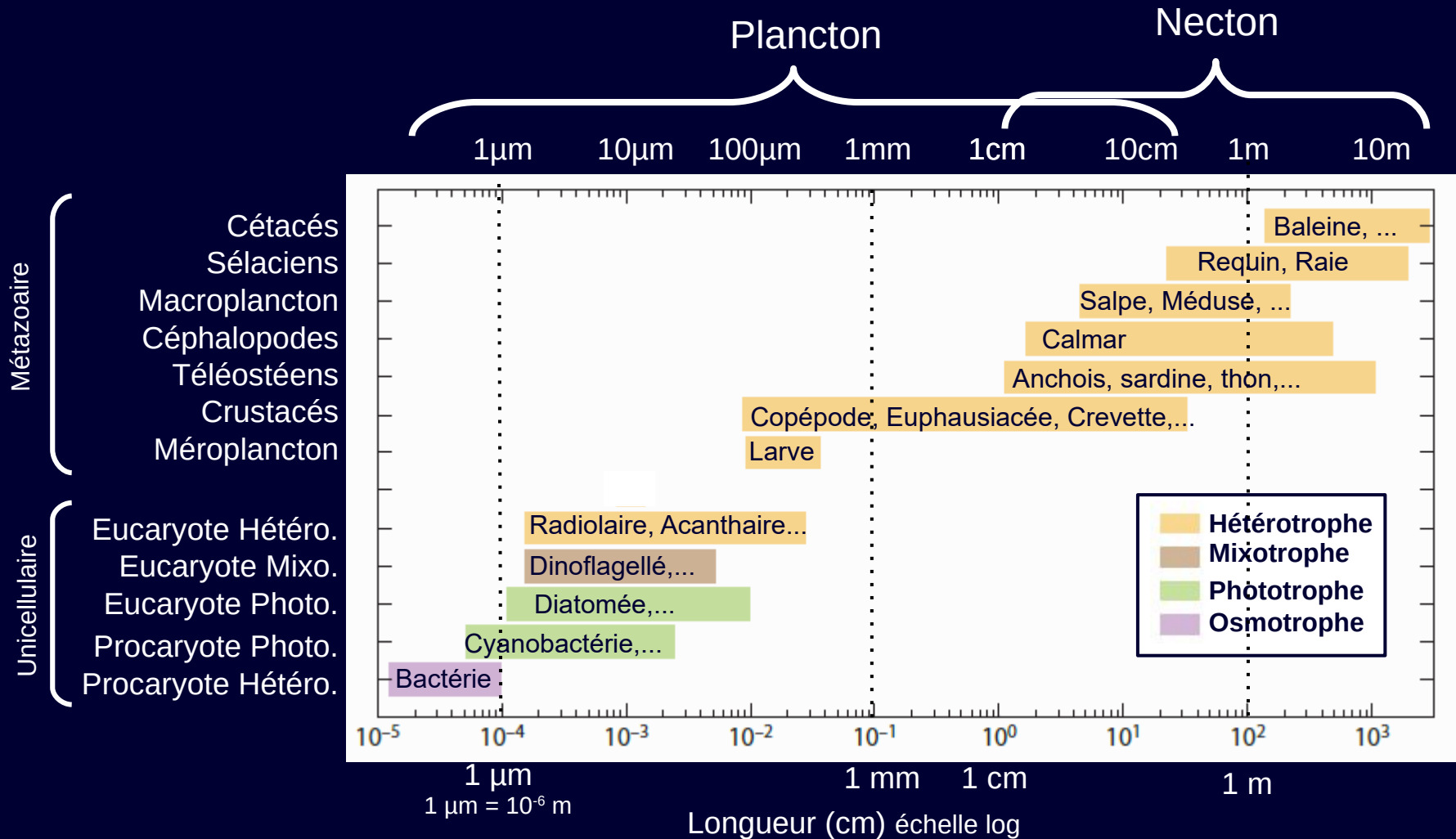
Mollusques Ptéropodes



Animaux, Mollusques Ptéropodes, Omnivores

Quelques aspects généraux du fonctionnement du domaine pélagique

Domaine pélagique, stratégie trophique et taille des organismes



Osmotrophe
qui se nourrit de liquides absorbés par osmose à travers la membrane cellulaire

Phototrophe
qui dépend de la photosynthèse comme source de carbone. (Autotrophe)

Mixotrophe
qui utilise une stratégie mixte combinant la photosynthèse avec la phagotrophie *

Hétérotrophe
qui se nourrit de substances organiques, ne peut effectuer la synthèse de ses éléments constituants

* phagotrophie : se nourrit à partir de matière organique particulaire.

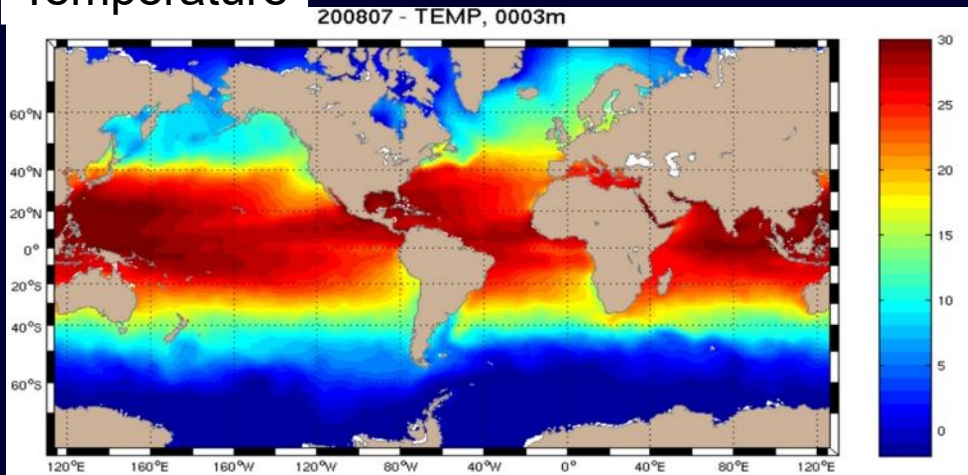


Fonctionnement des écosystèmes pélagiques

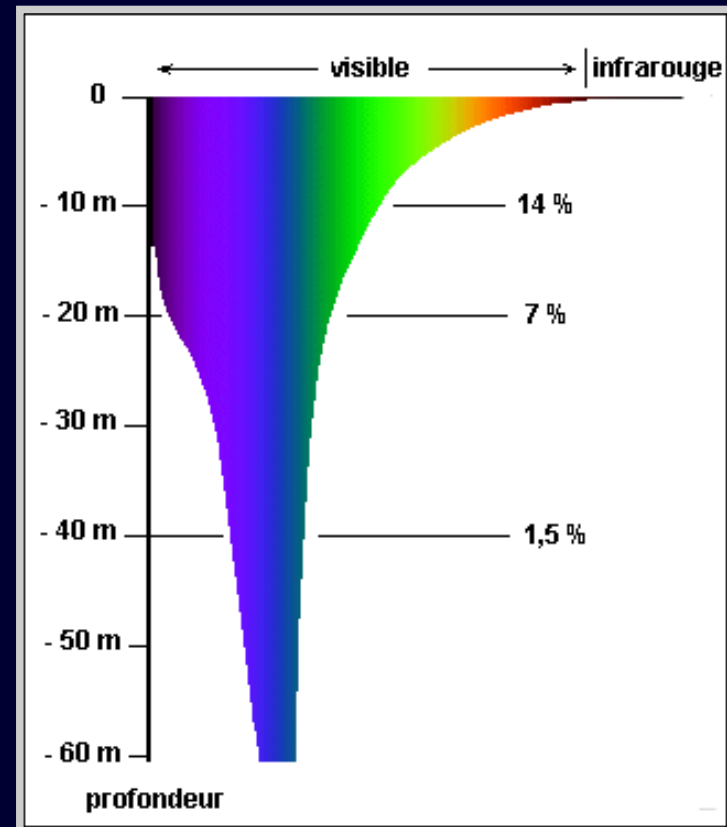


Le domaine pélagique : un espace en trois dimensions

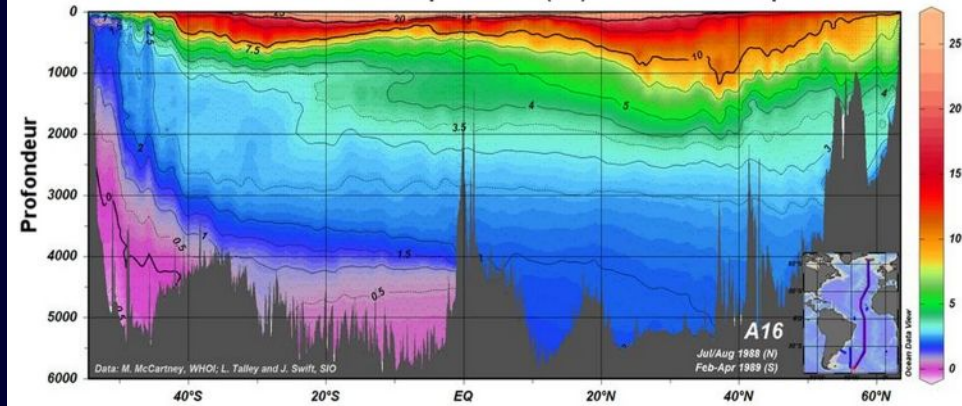
Température



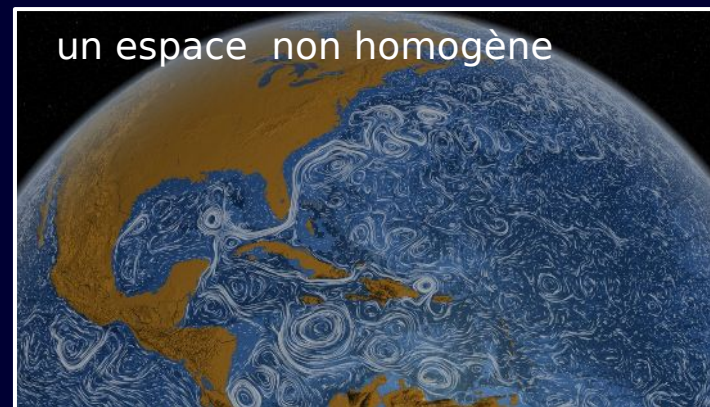
Lumière



Profil des températures (C°) - Océan Atlantique

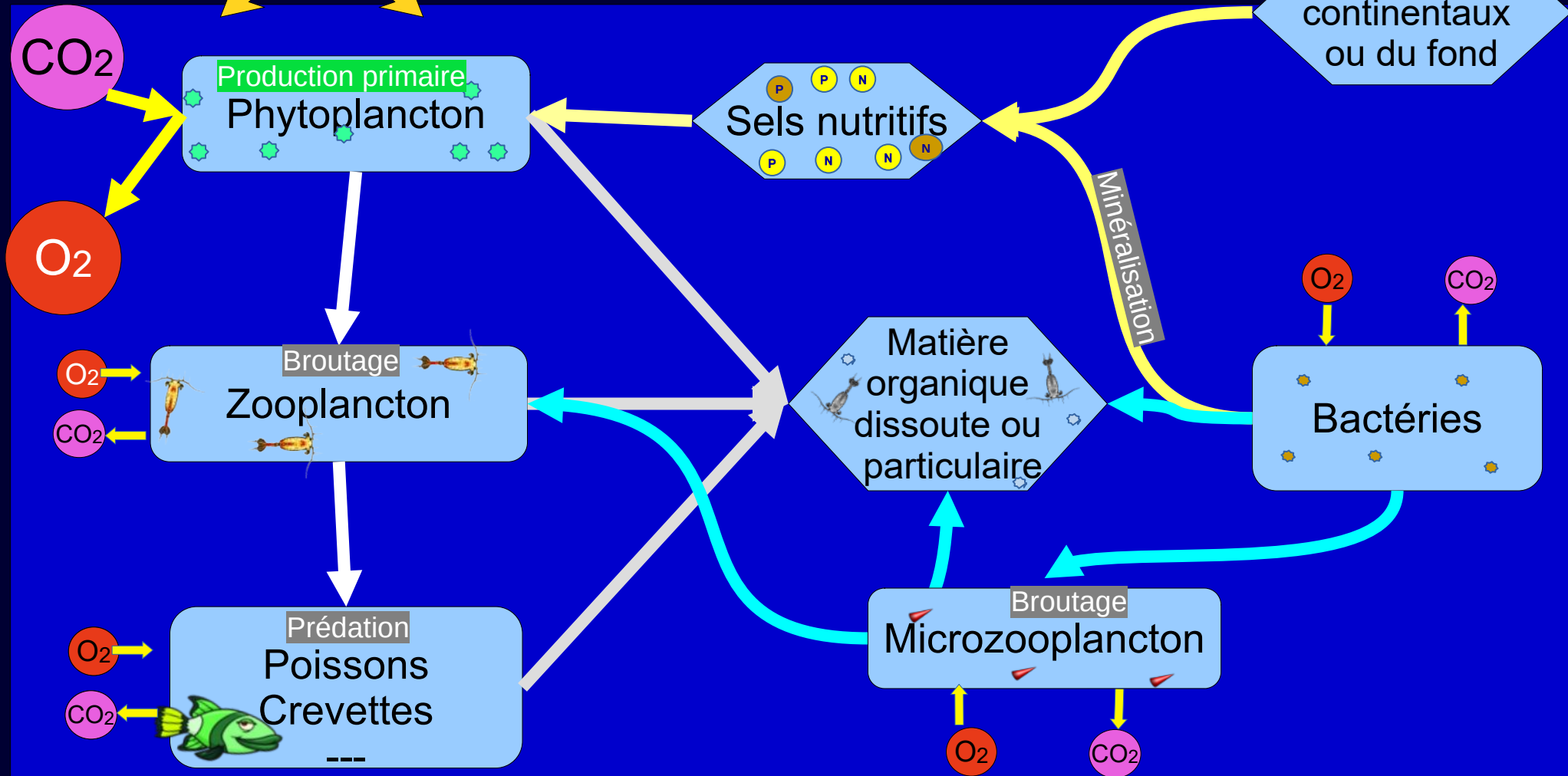
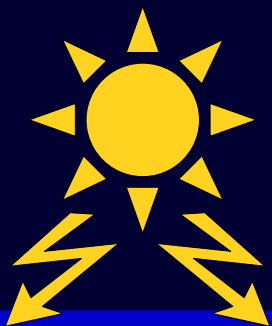


un espace non homogène



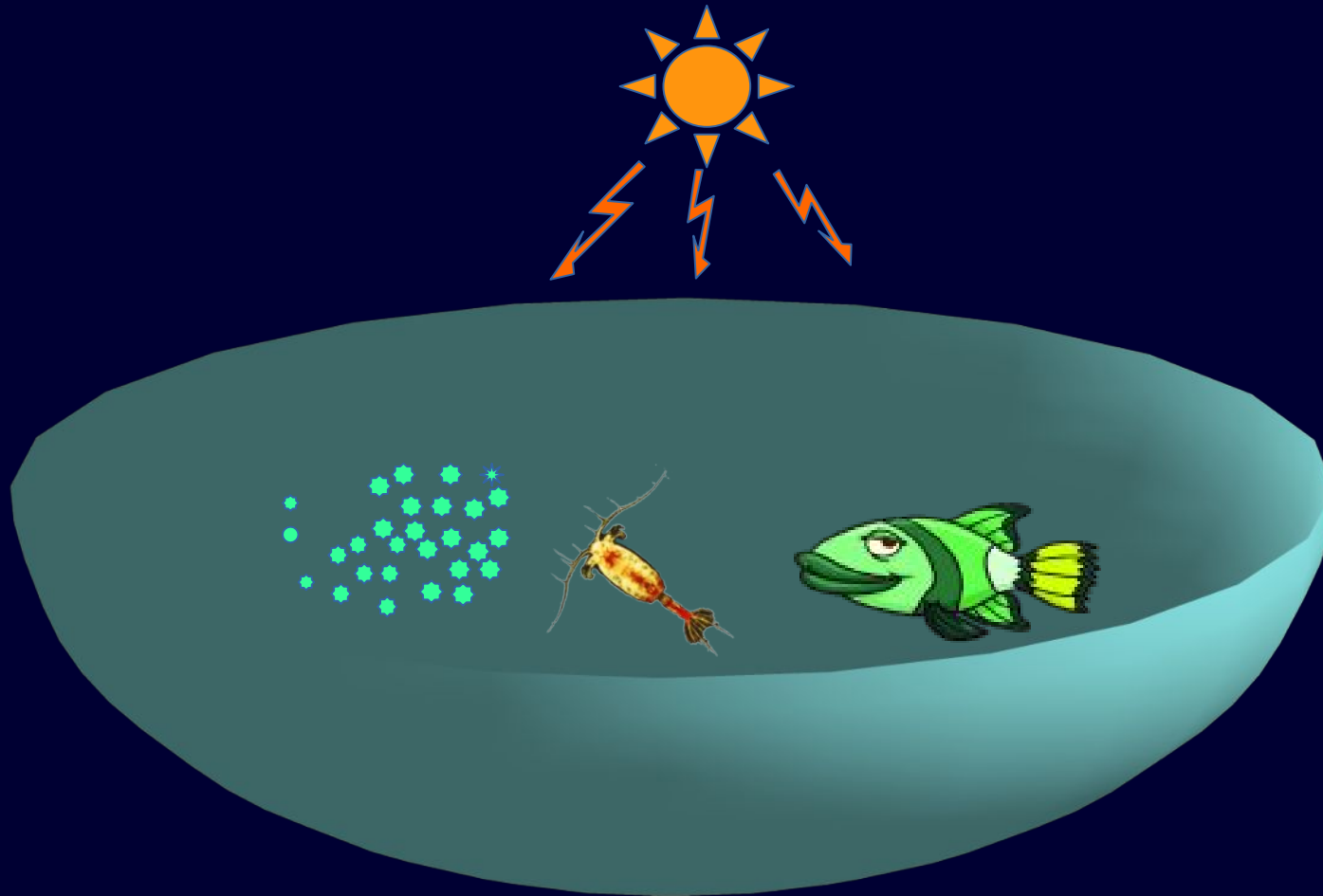
Éléments essentiels des réseaux trophiques pélagiques

— Chaîne alimentaire classique
— Boucle microbienne

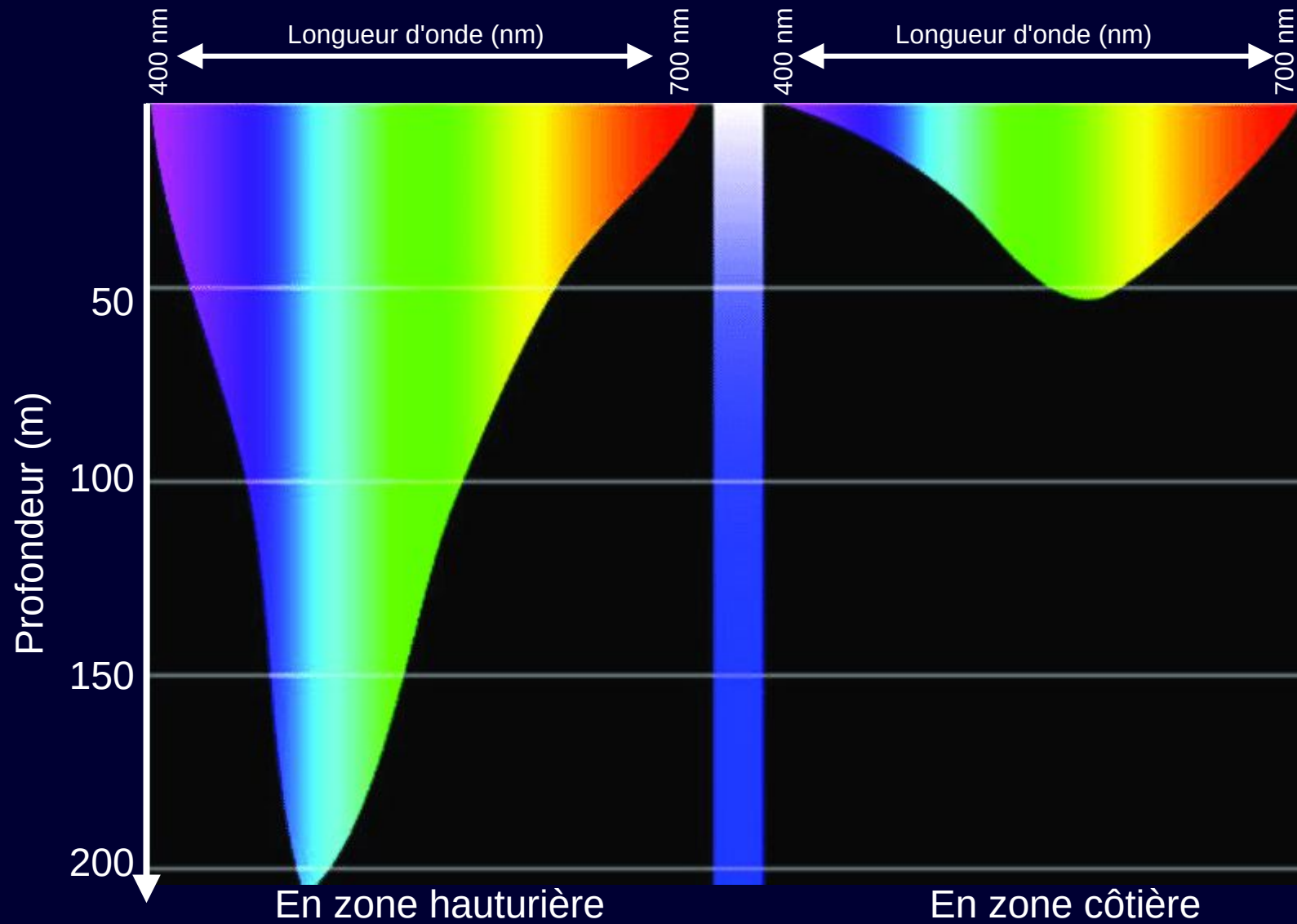


$$\text{O}_2 \cong \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2$$

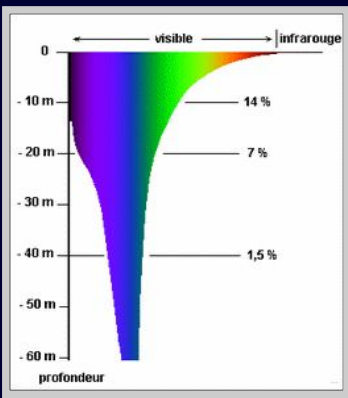
Avant d'aller vers des exemples "réels",
spatialisons un océan théorique.



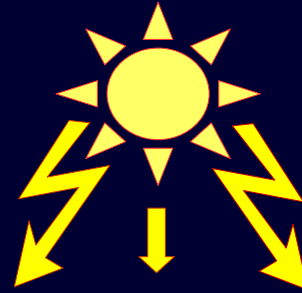
Pénétration de la lumière dans l'océan



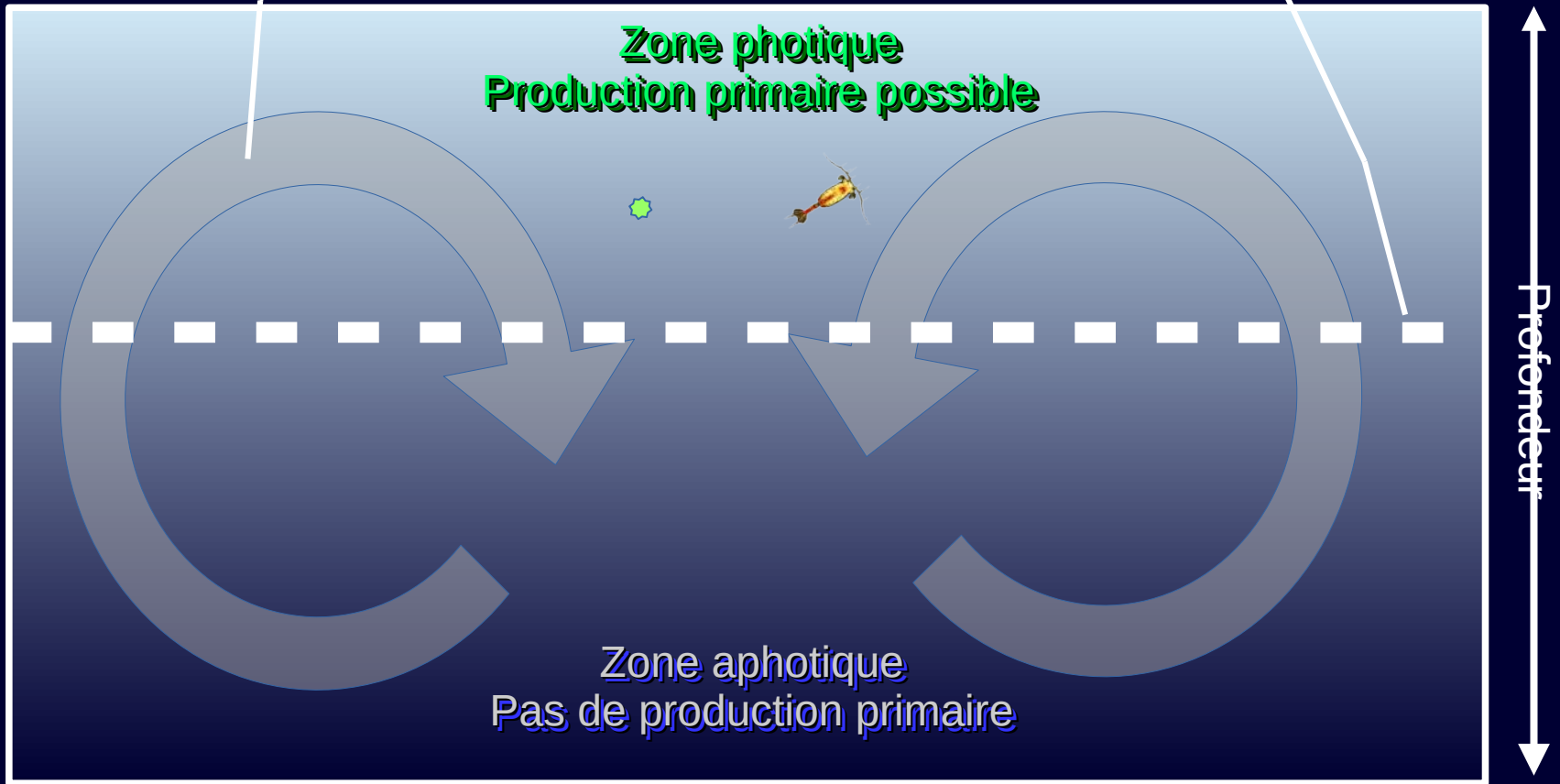
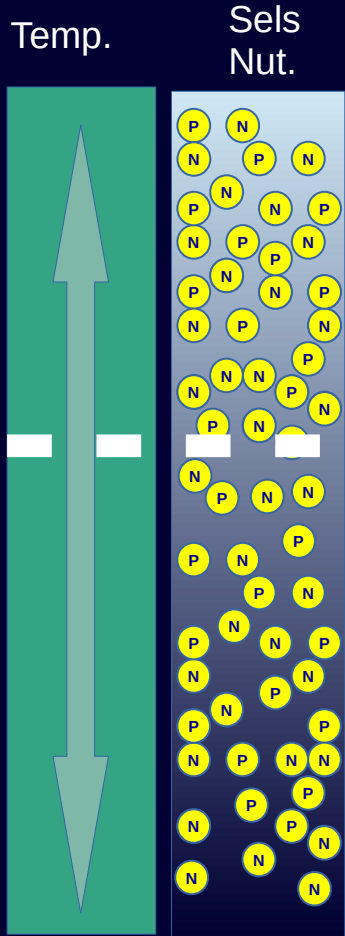
Vision dans un océan en 2D



Mélange
Turbulence, ≠ densité



Profondeur de compensation



Profondeur de compensation : profondeur où la quantité de lumière est juste suffisante pour permettre aux algues de compenser leurs pertes sans croître.

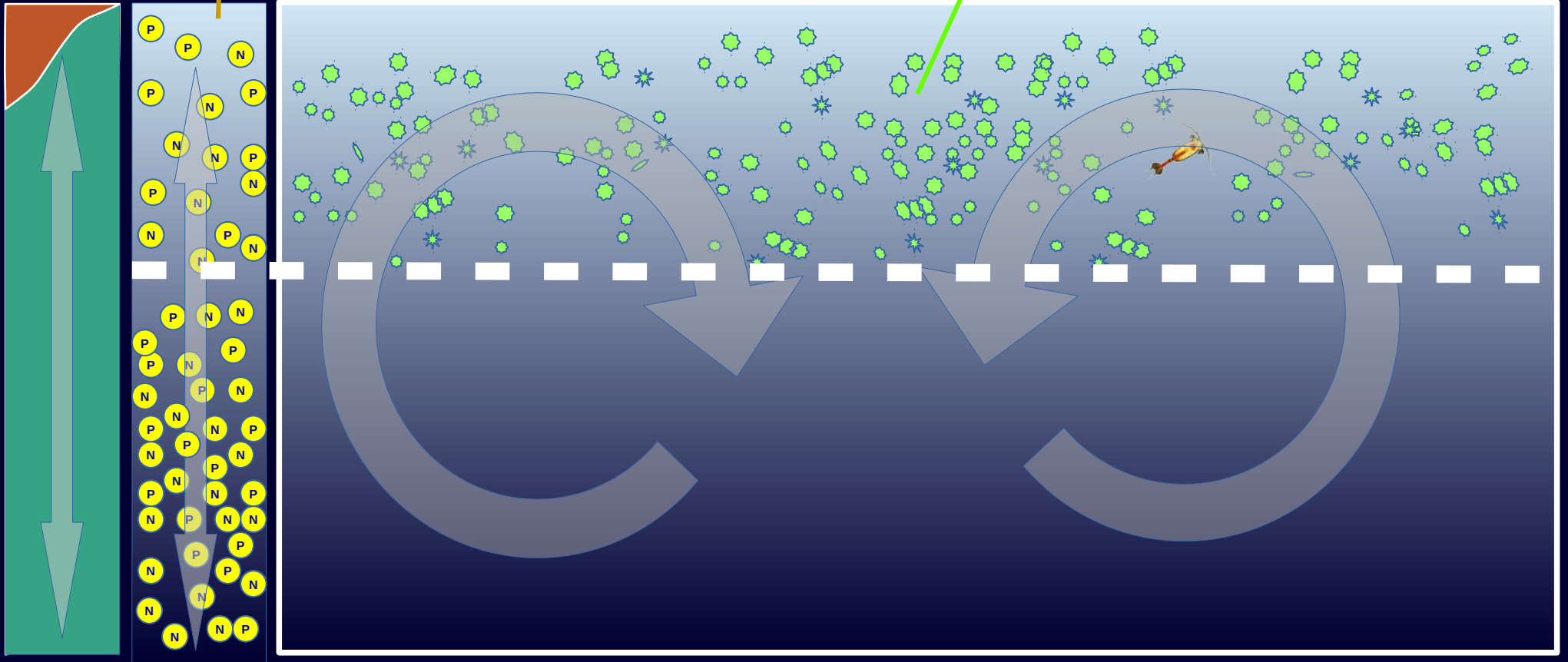
Développement du phytoplancton

Consommation des sels nutritifs compensée par mélange

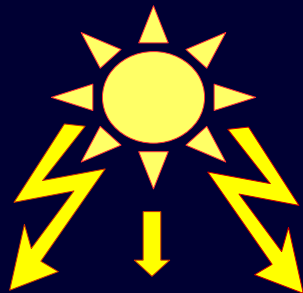
Développement du plancton végétal par photosynthèse



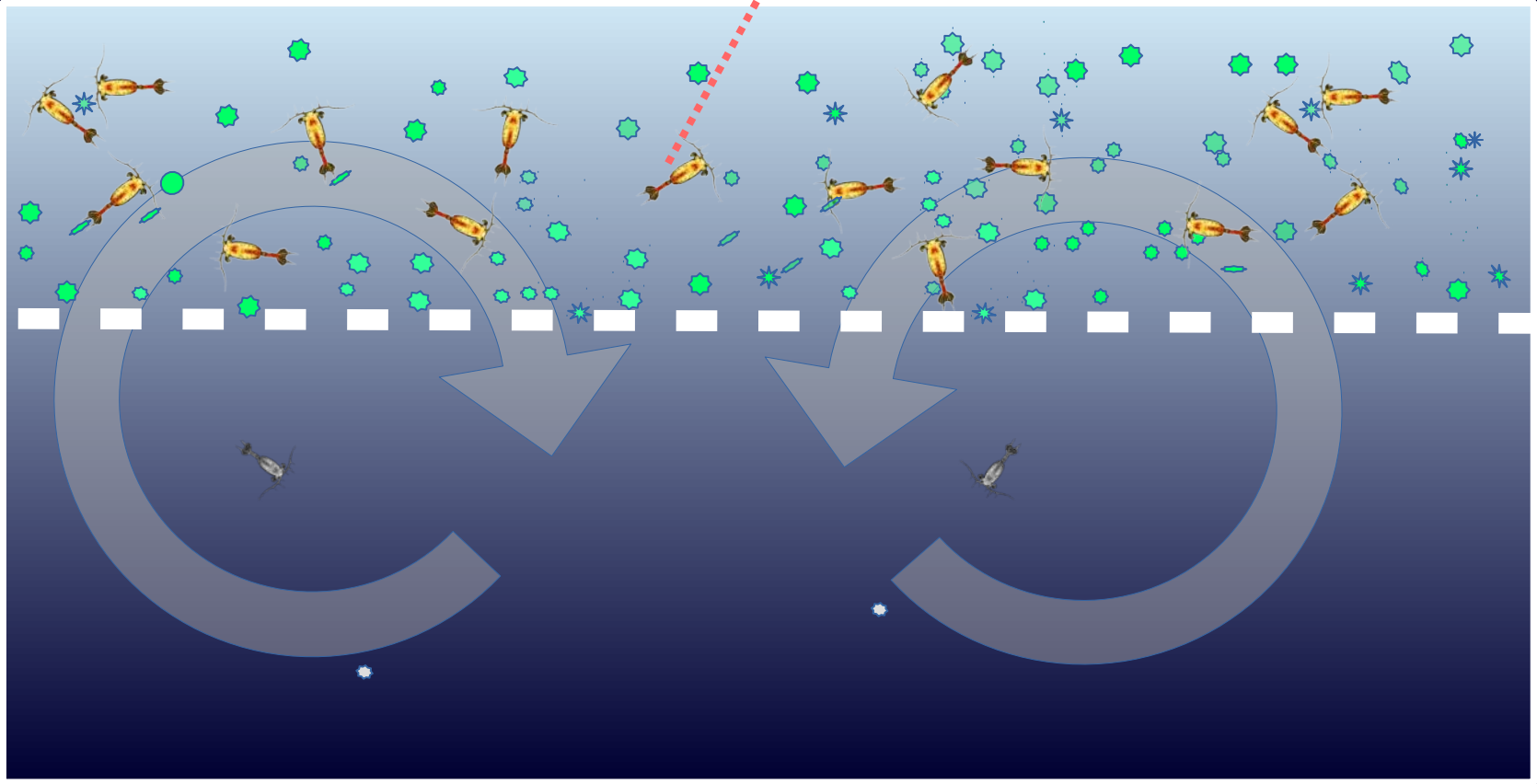
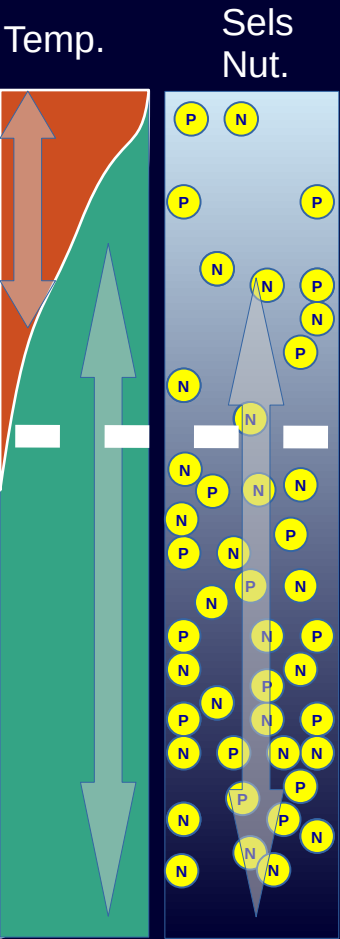
Temp.



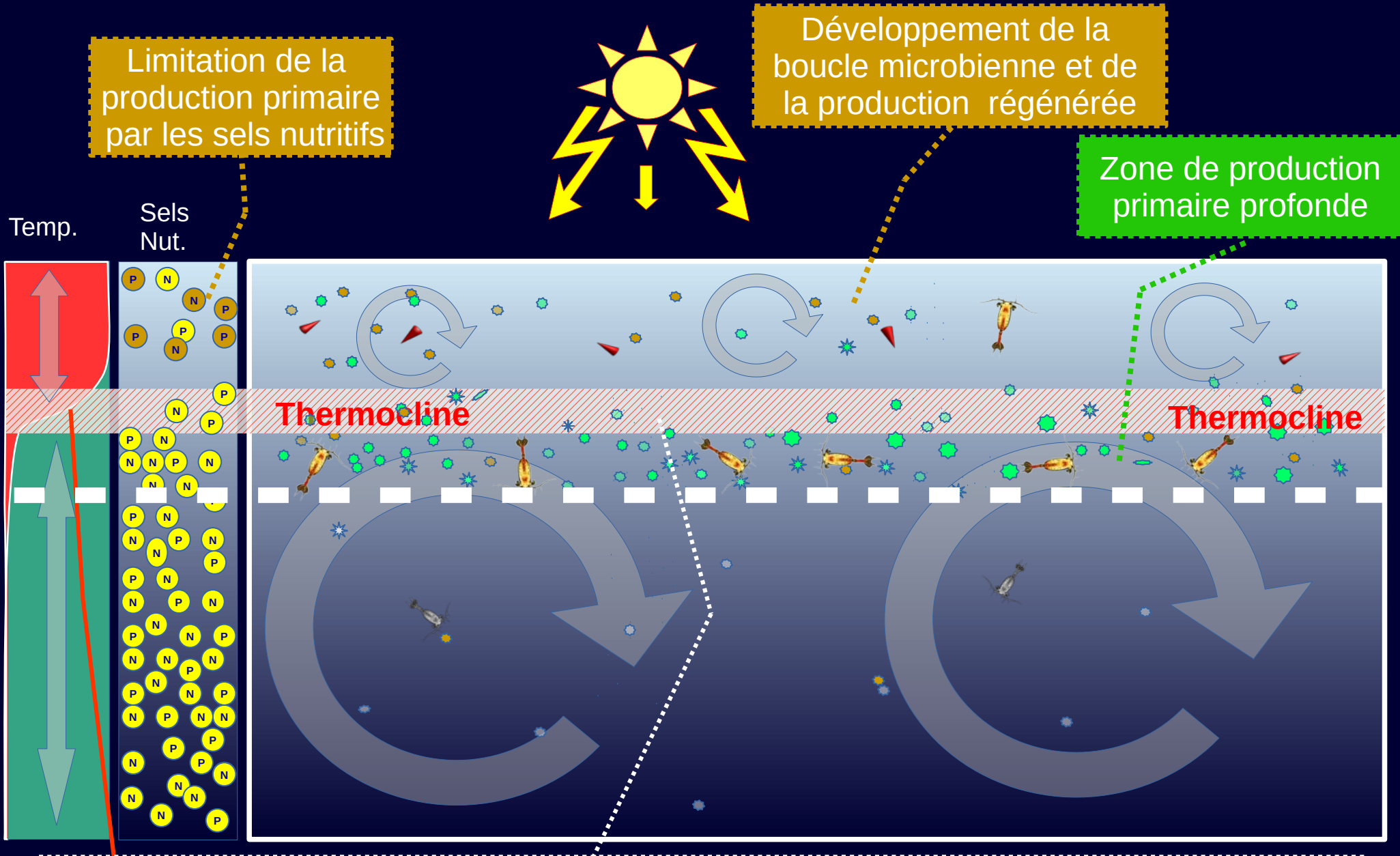
Broutage par le zooplancton



Développement
du plancton animal par
broutage du plancton végétal



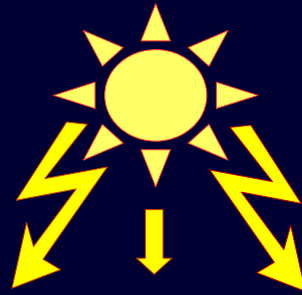
Création d'une thermocline et limitation de la production primaire



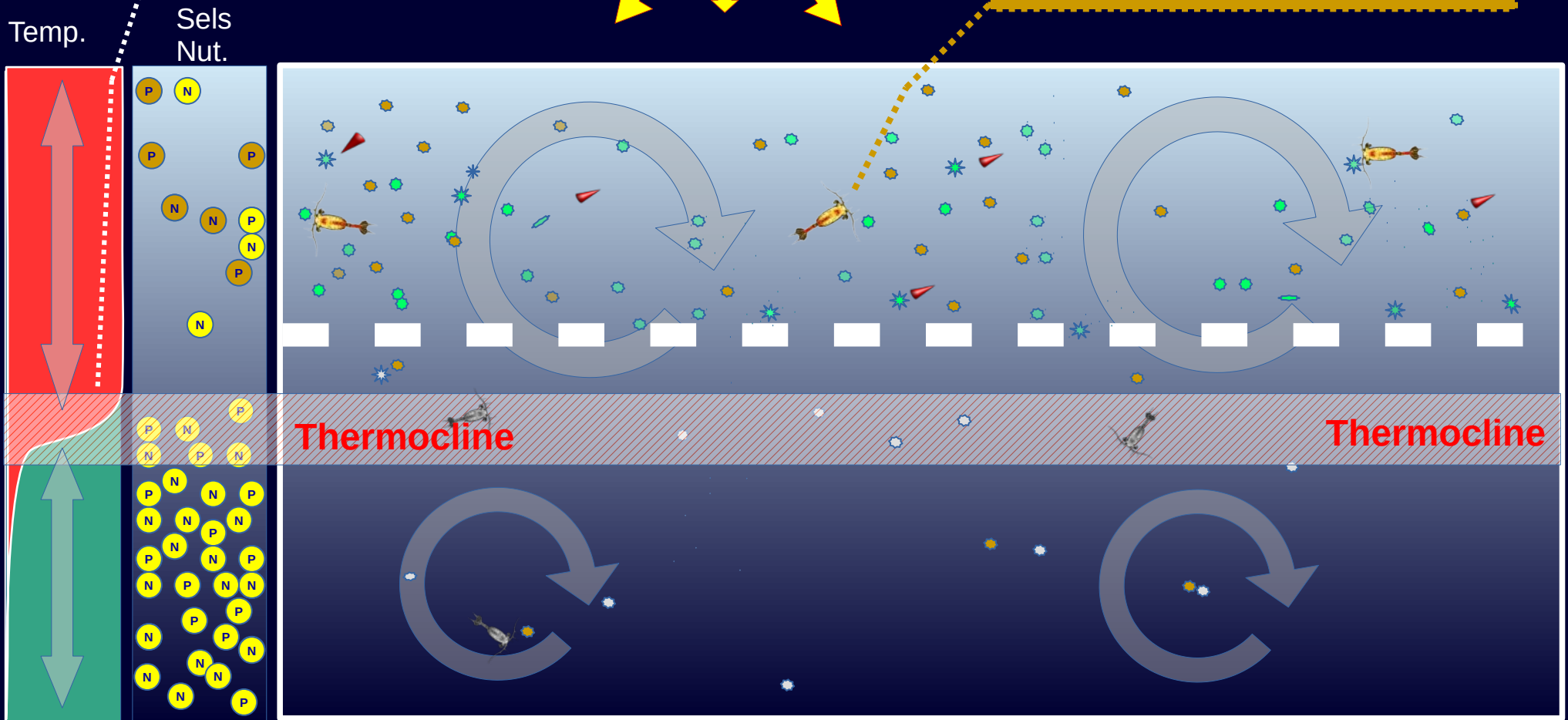
Création d'une thermocline, donc d'une pycnocline qui entraîne une barrière physique entre les eaux superficielles et les eaux profondes.

Création d'une zone oligotrophe permanente en surface

Approfondissement de la thermocline.



Écosystème oligotrophe* : basé sur la boucle microbienne et la production régénérée

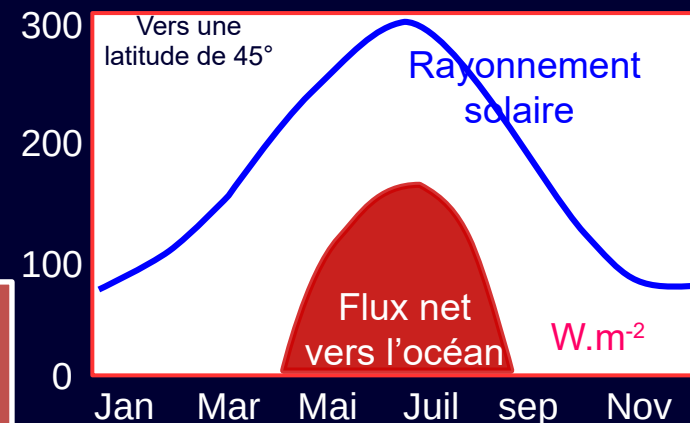


* Milieu oligotrophe : milieu particulièrement pauvre en éléments nutritifs.

Illustration de la dynamique d'un système pélagique dans le temps
Cas réel : la station « point B », Villefranche/mer



Cycle annuel de la température

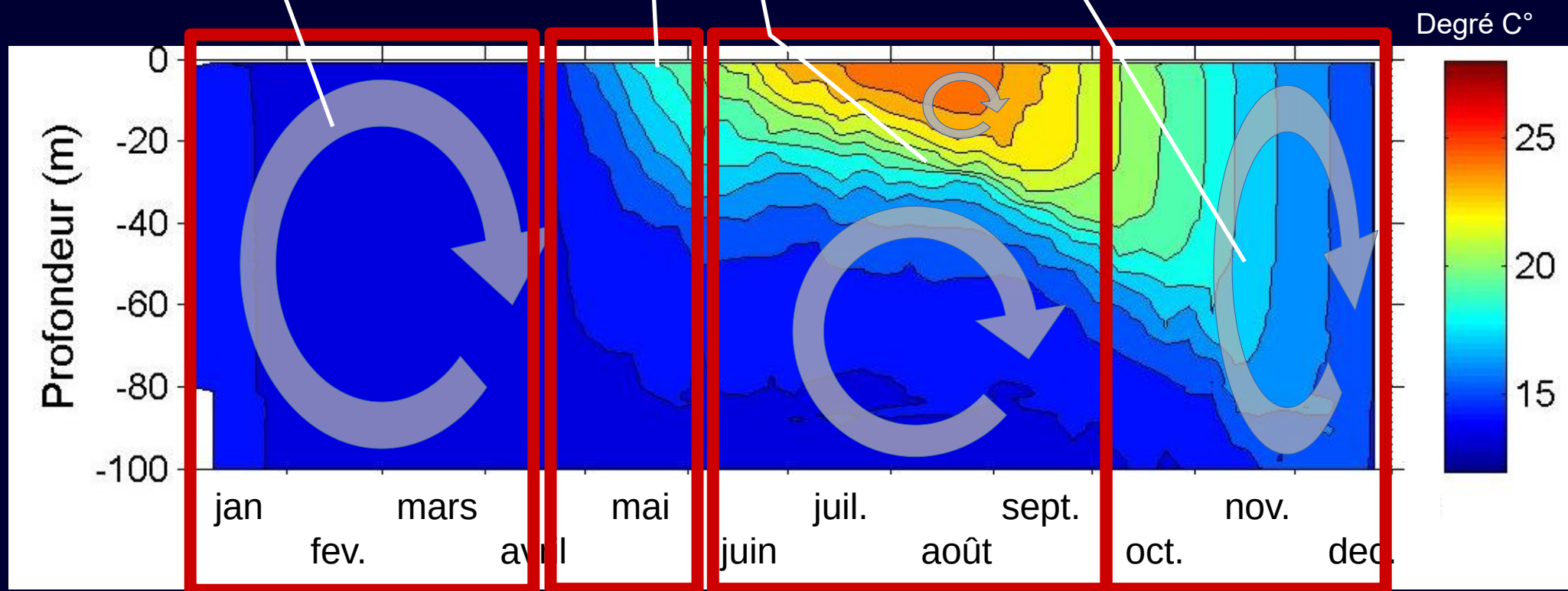


Très faible stratification en hiver

Réchauffement de surface dû au bilan thermique

Thermocline saisonnière

Homogénéisation de la colonne d'eau lors de la déstratification automnale

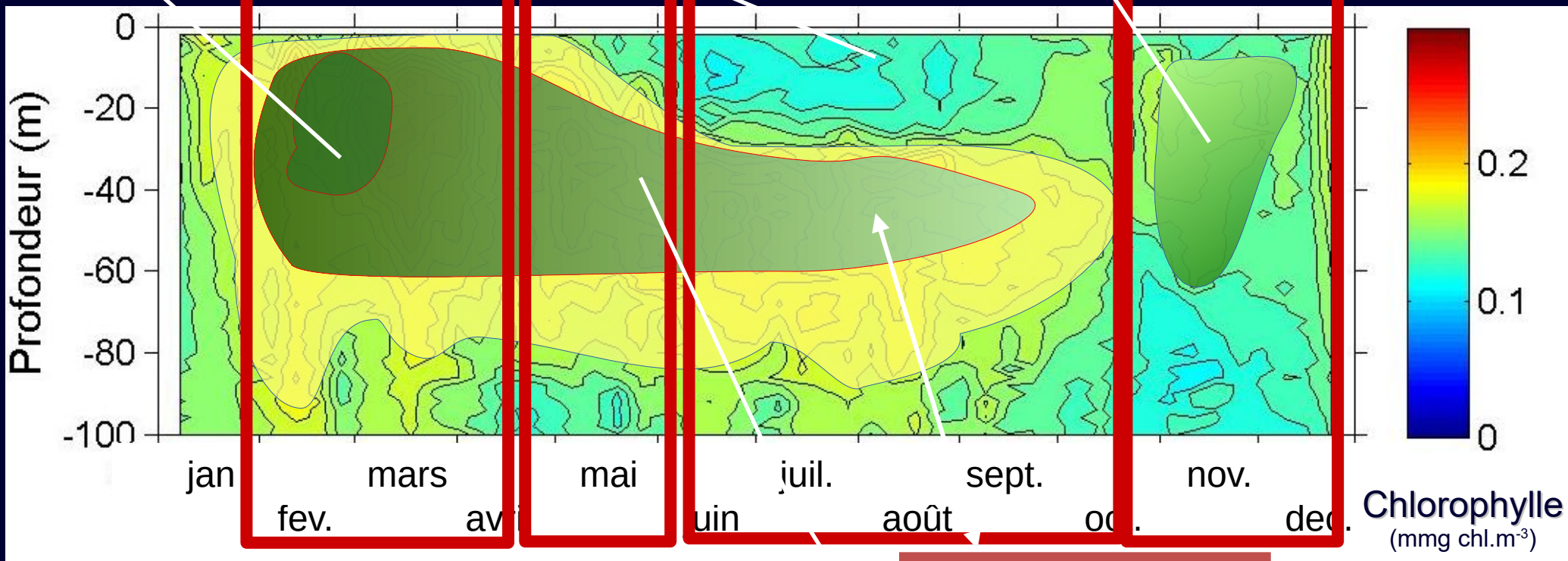


Cycle annuel du phytoplancton

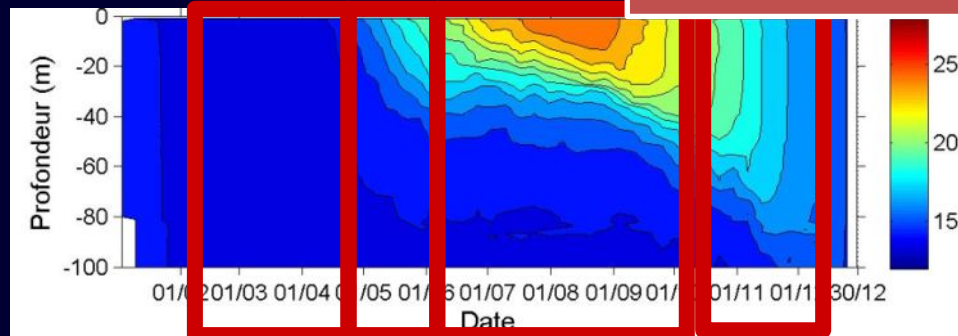
Bloom printanier

Oligotrophie de surface estivale

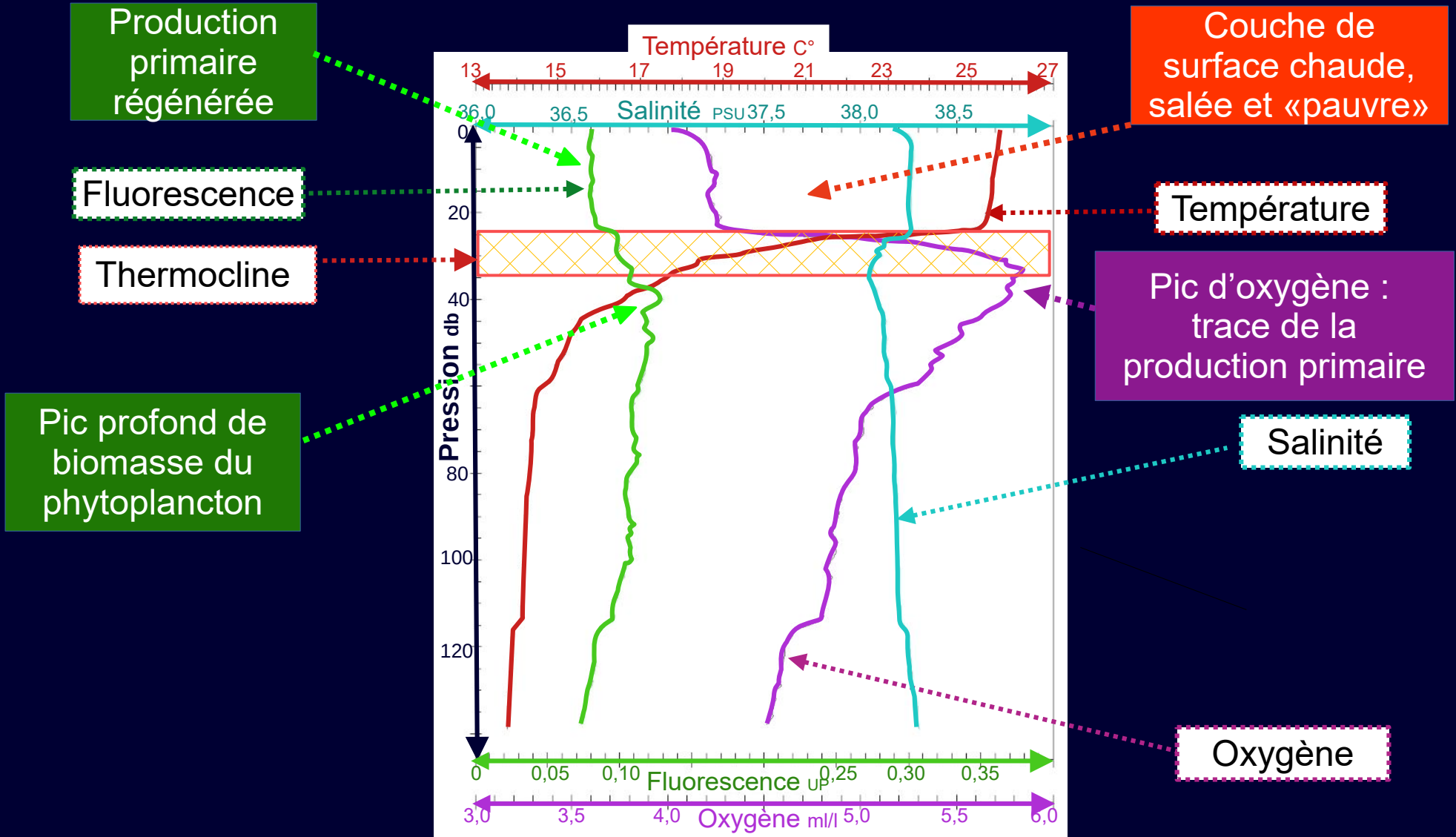
Bloom automnal dû à la dé-stratification



Production primaire sous la thermocline



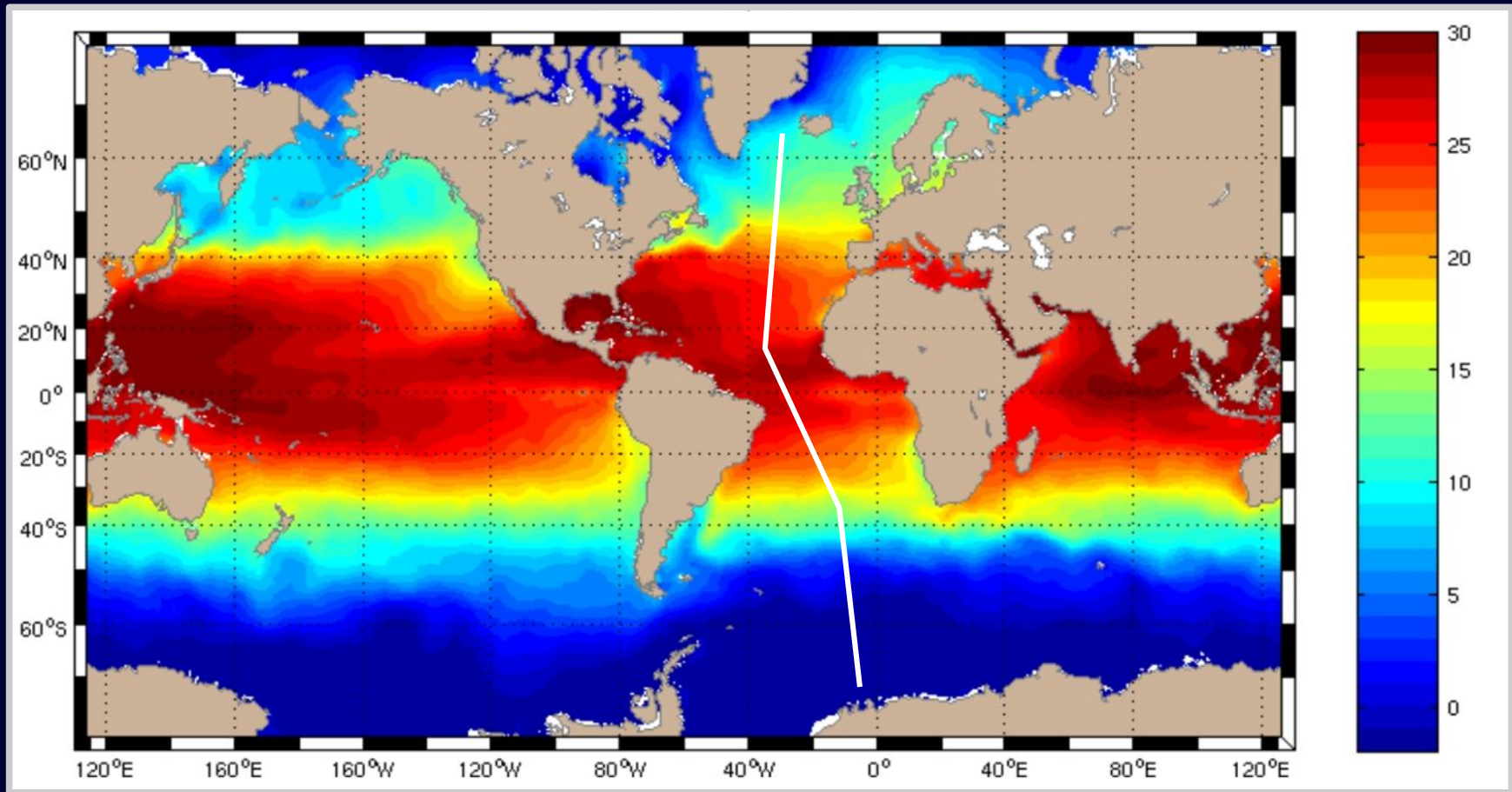
Profil CTD, rade de Vilefranche/mer, 13 septembre 2022



D'une vision dans le temps à une vision dans l'espace, ou
la thermocline se rappelle à notre bon souvenir.

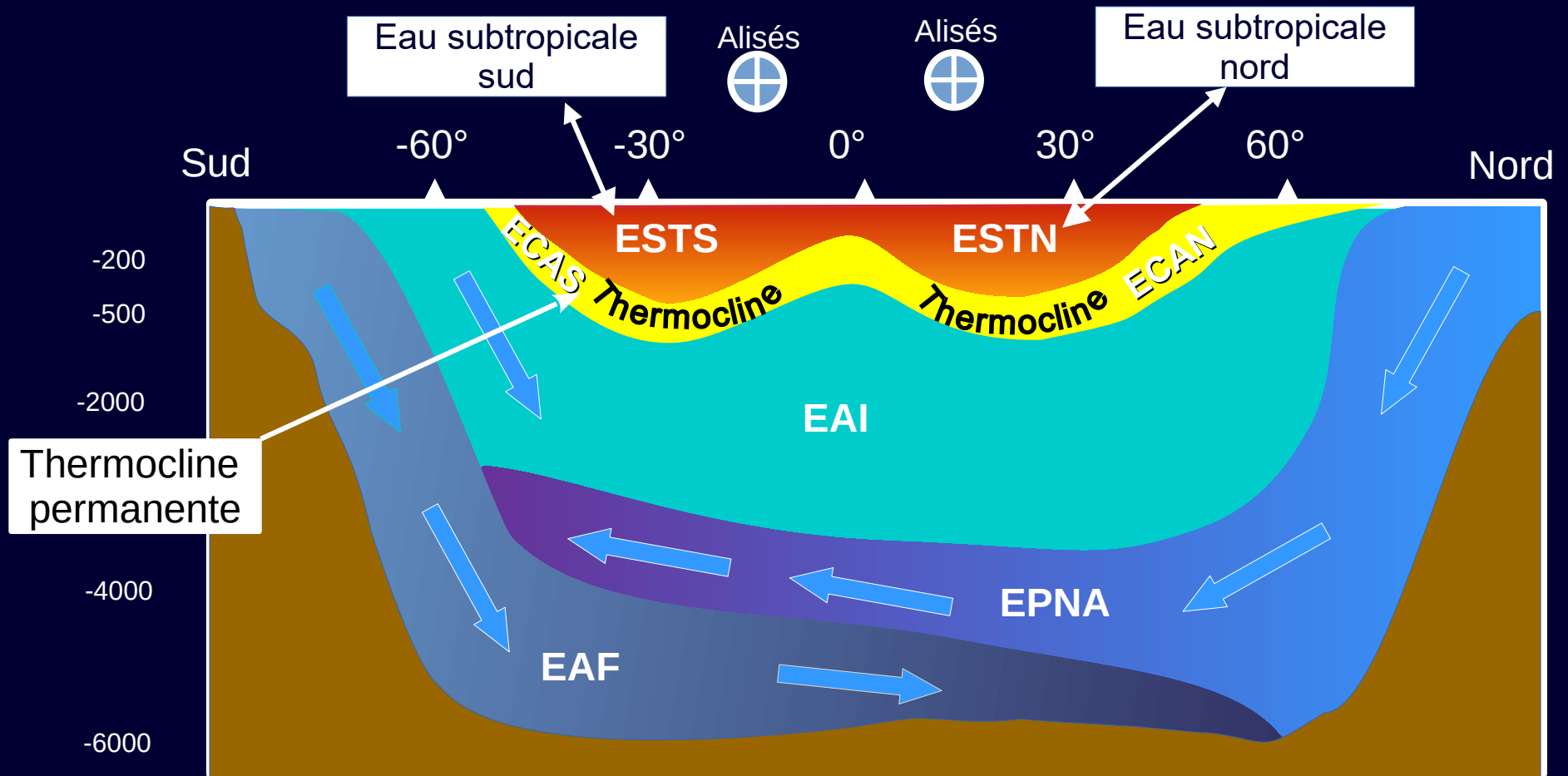
Fonctionnement
de systèmes pélagiques tropicaux

Températures de surface Juillet 2008



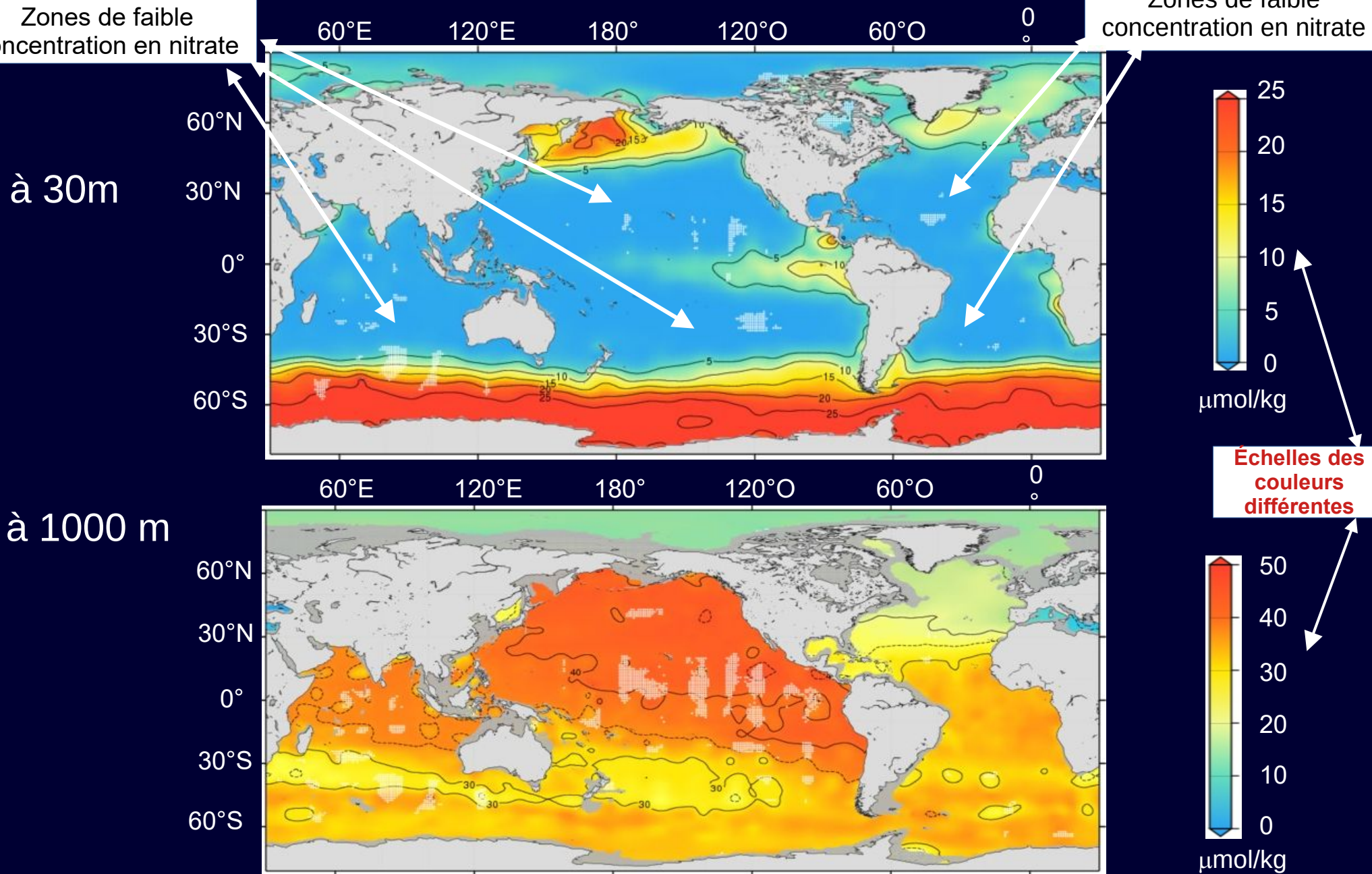
Données des flotteurs Argo Coriolis/Ifremer

Schéma simplifié de la circulation océanique dans l'Atlantique

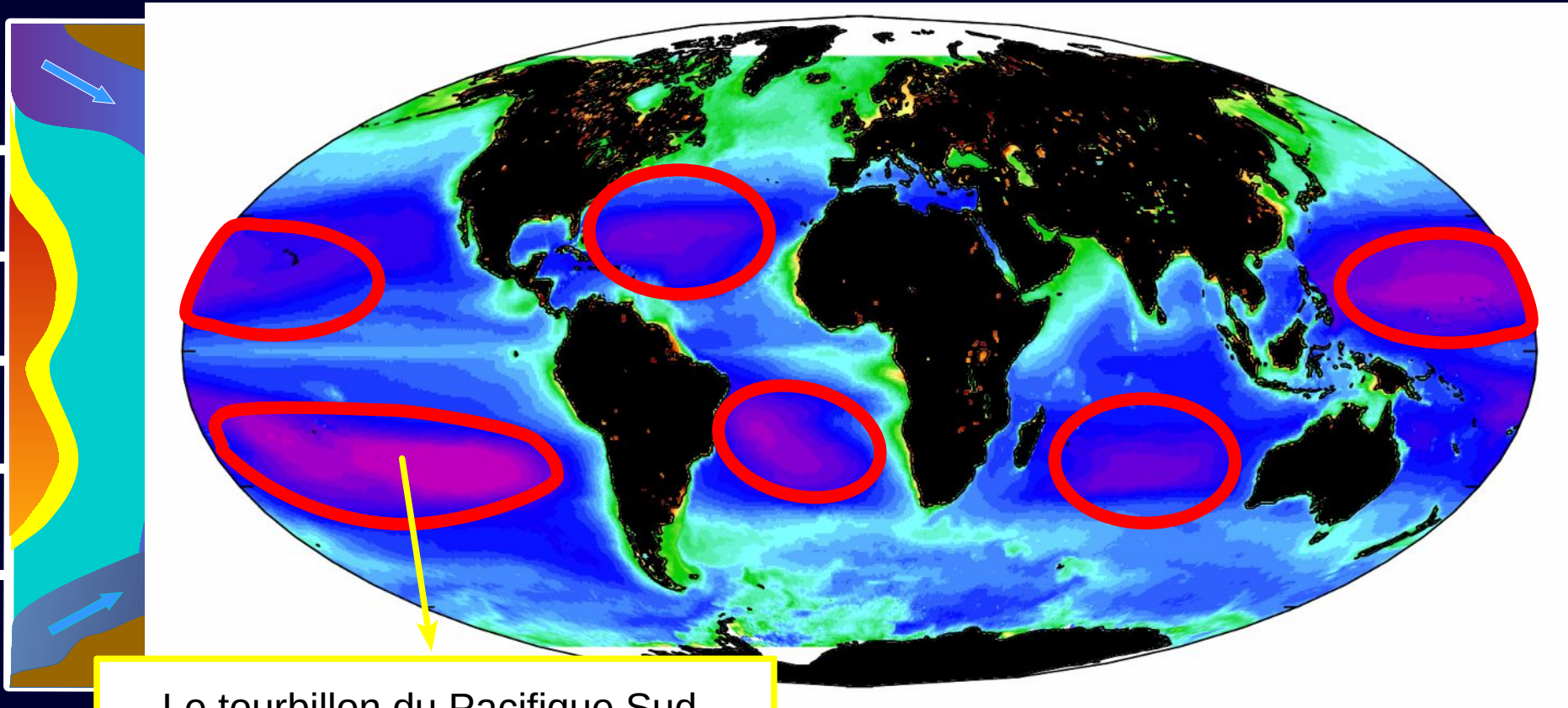
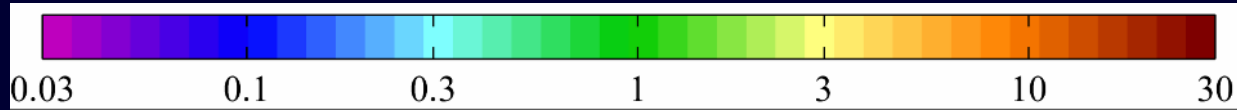


EAF : Eau antarctique de fond
EPNA : Eau profonde nord atlantique
EAI : Eau antarctique intermédiaire
ESTN, ESTS : Eau subtropicale nord et sud
ECAN, ECAS : Eau centrale atlantique nord et sud

Moyenne annuelle des nitrates ($\mu\text{mol/kg}$)



Chlorophylle moyenne en surface, 1996 -2006. (mg chl.m⁻³)



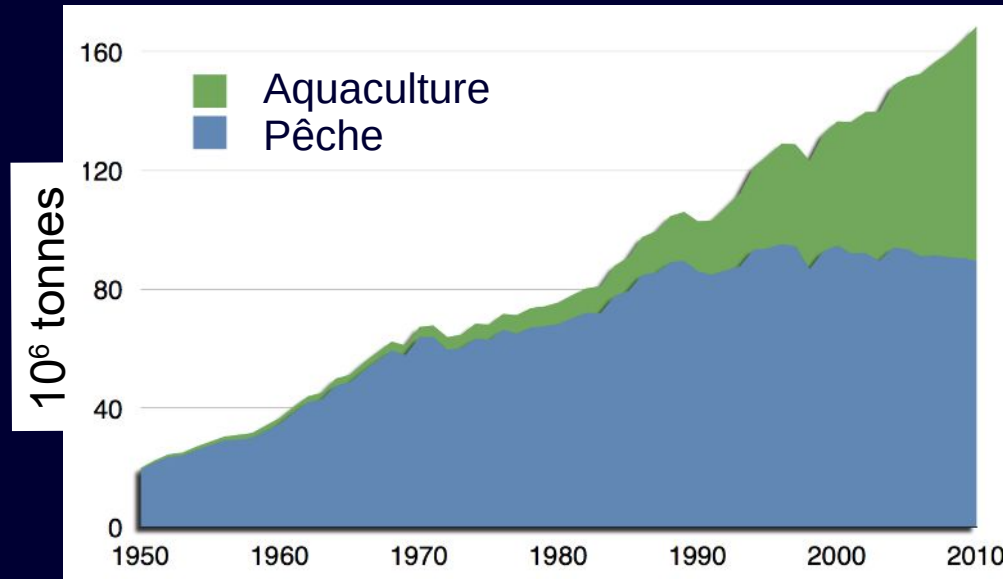
Le tourbillon du Pacifique Sud,
la zone la plus oligotrophe au monde

SeaWiFS. (NASA)

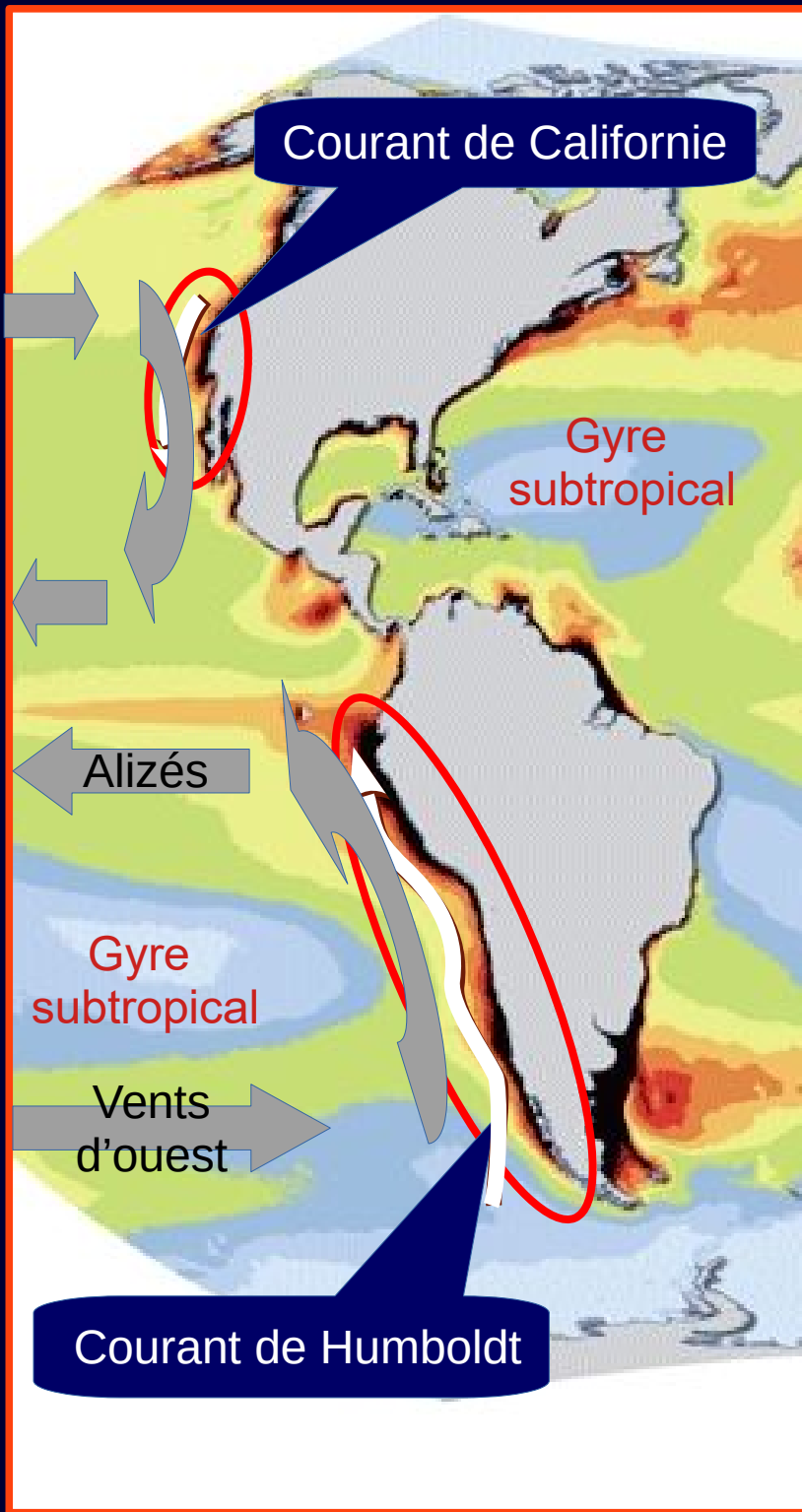
- Nitrates indétectables dans la couche 0-100m (et souvent 0-120m),
- Teneurs en chlorophylle inférieures à 0,03 mg Chl a m⁻³
- Maximum de chlorophylle très profond, en deçà de 120 m
- Eaux très claires : la couche euphotique s'étend au delà de 125 m voire 150 m

La suite de l'histoire où on reparle de thermocline
et où on répond à la question :

Pourquoi 3% de la surface des océans représentent
de 20 à 35 % des captures de la pêche?

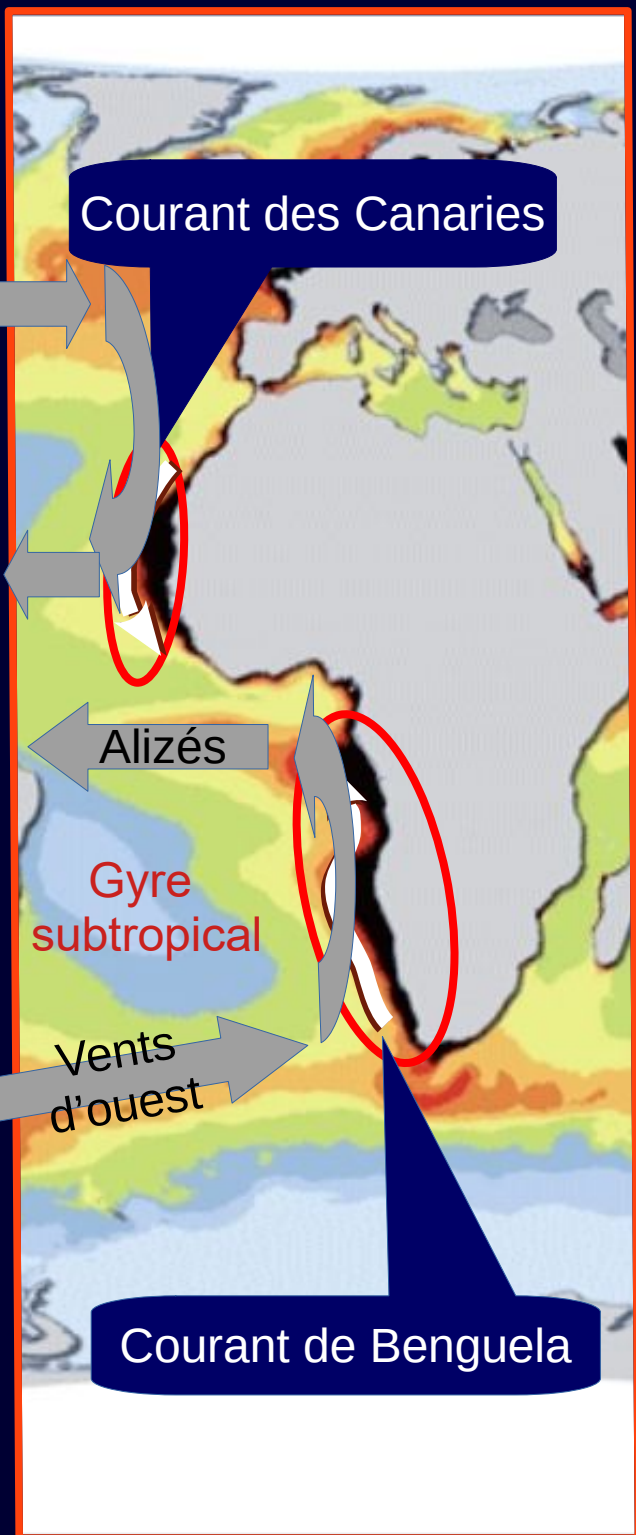
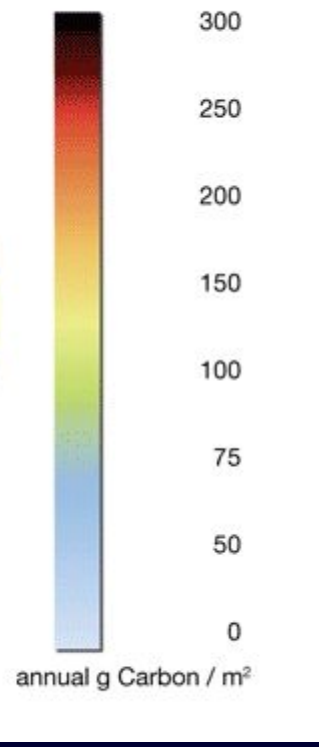


Ou : de l'importance des mouvements verticaux dans l'océan



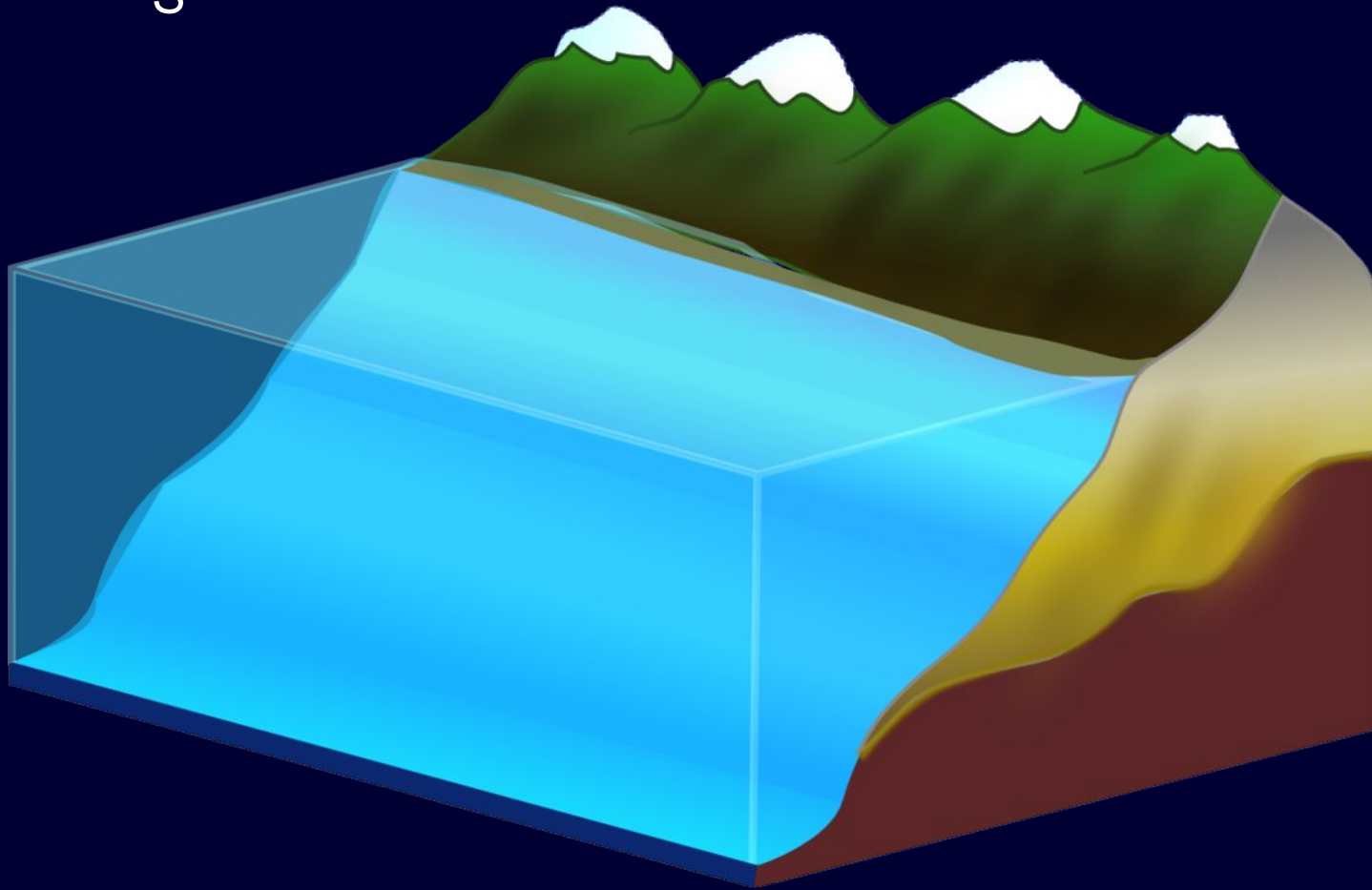
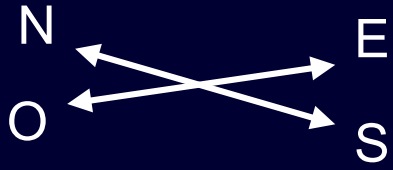
Upwelling remontée d'eau

Production primaire nette par an, 1998-2006

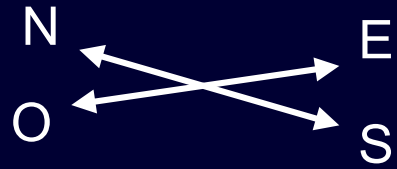


Source : Oregon state University, 2007

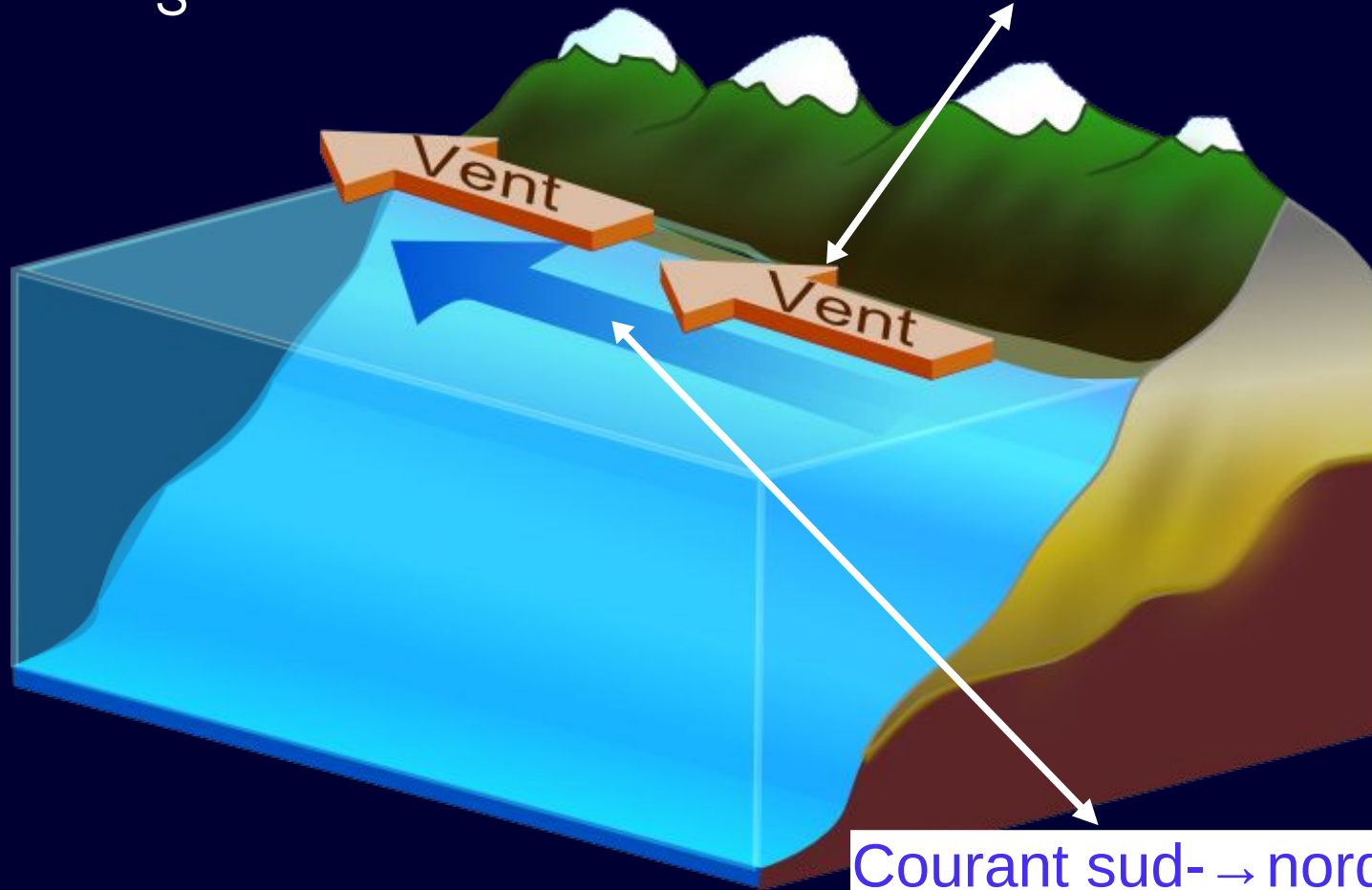
Upwelling dans l'hémisphère sud



Upwelling dans l'hémisphère sud

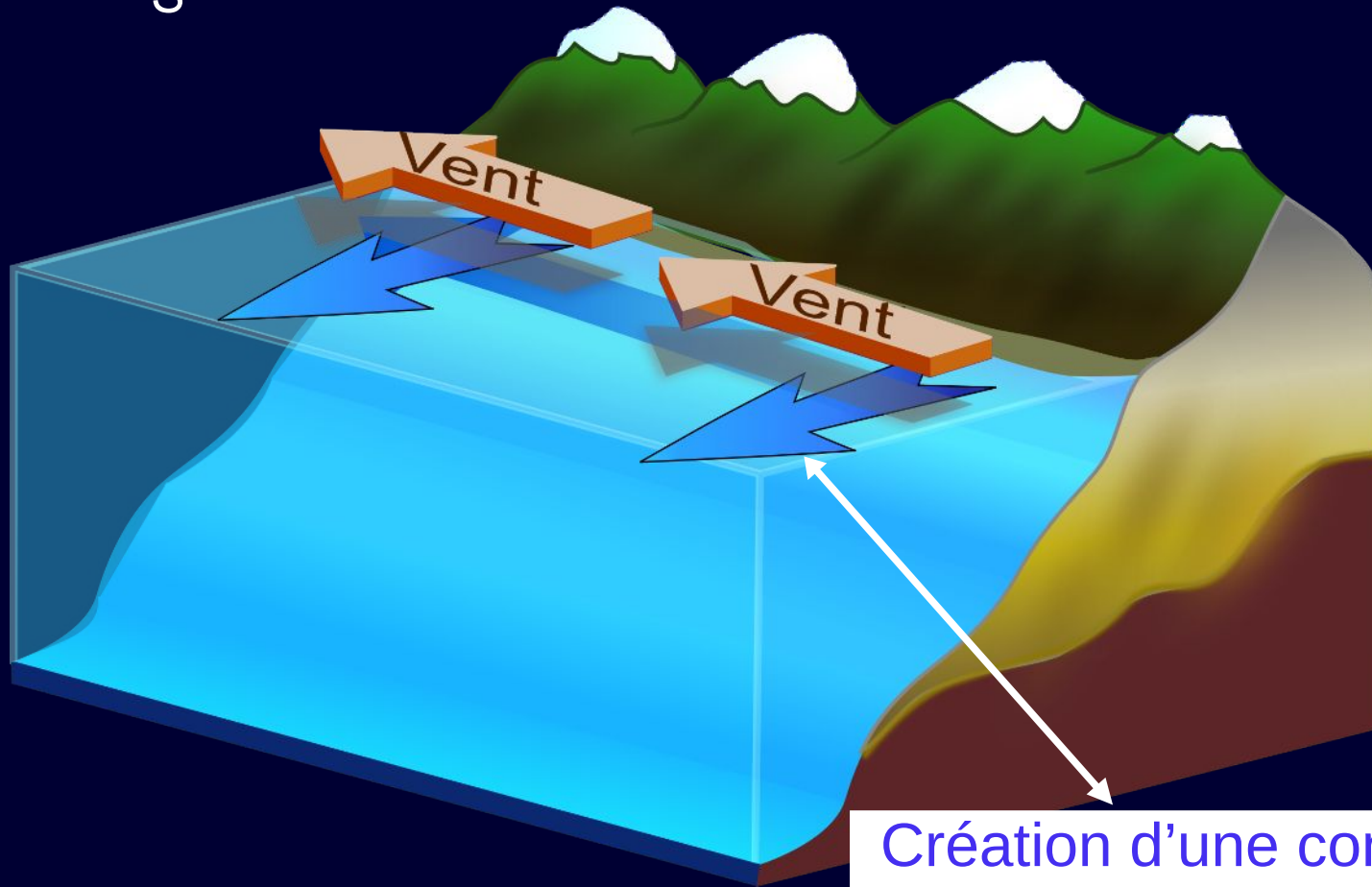
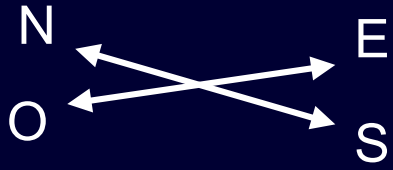


Vent sud- → nord



Courant sud- → nord induit par le vent

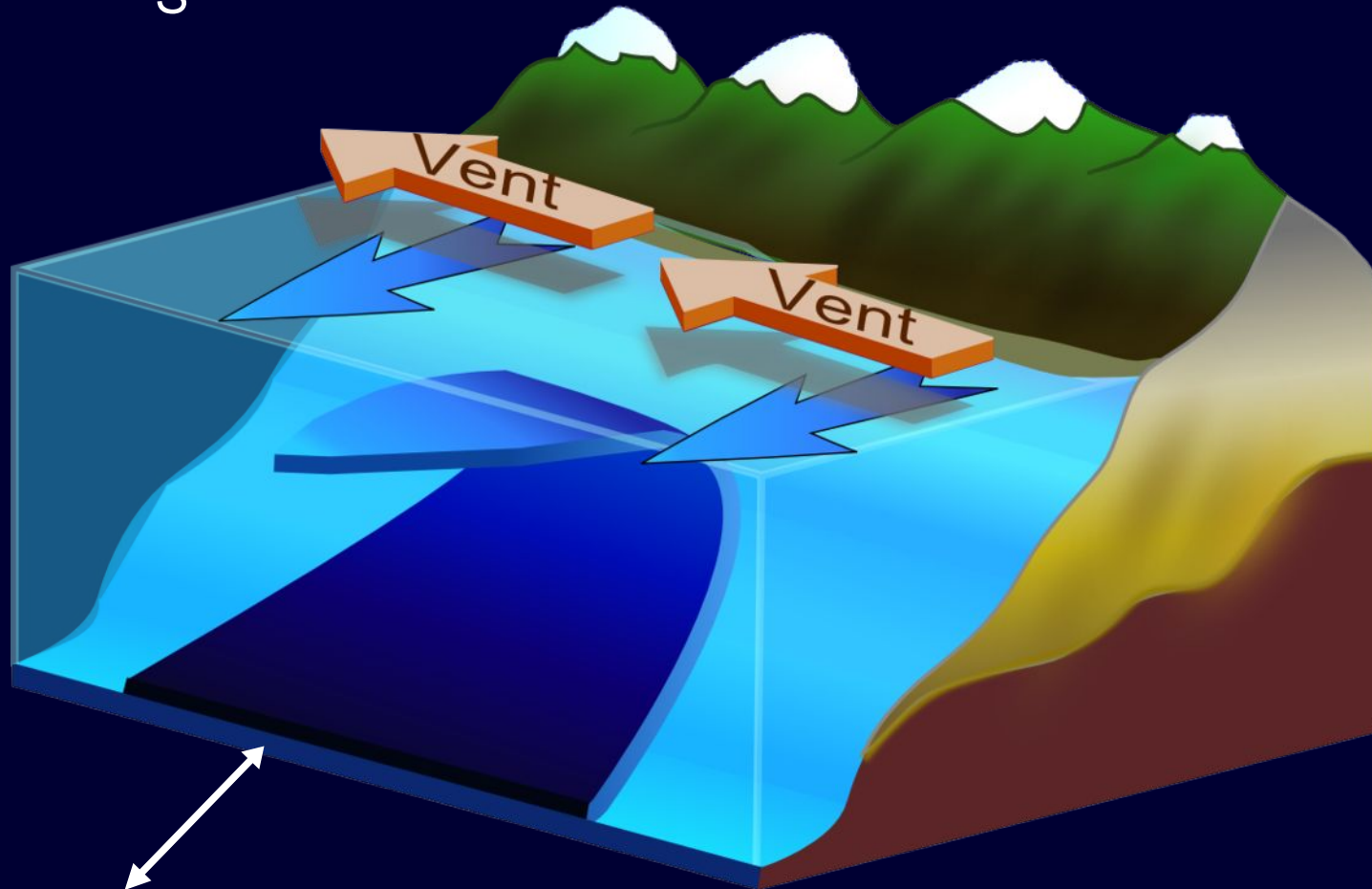
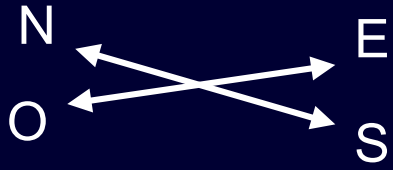
Upwelling dans l'hémisphère sud



Création d'une composante
côte → large du courant par
la force de Coriolis*

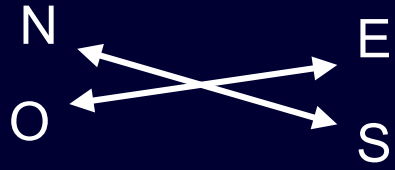
*Effets de la force de Coriolis, vers la gauche dans hémisphère sud.

Upwelling dans l'hémisphère sud

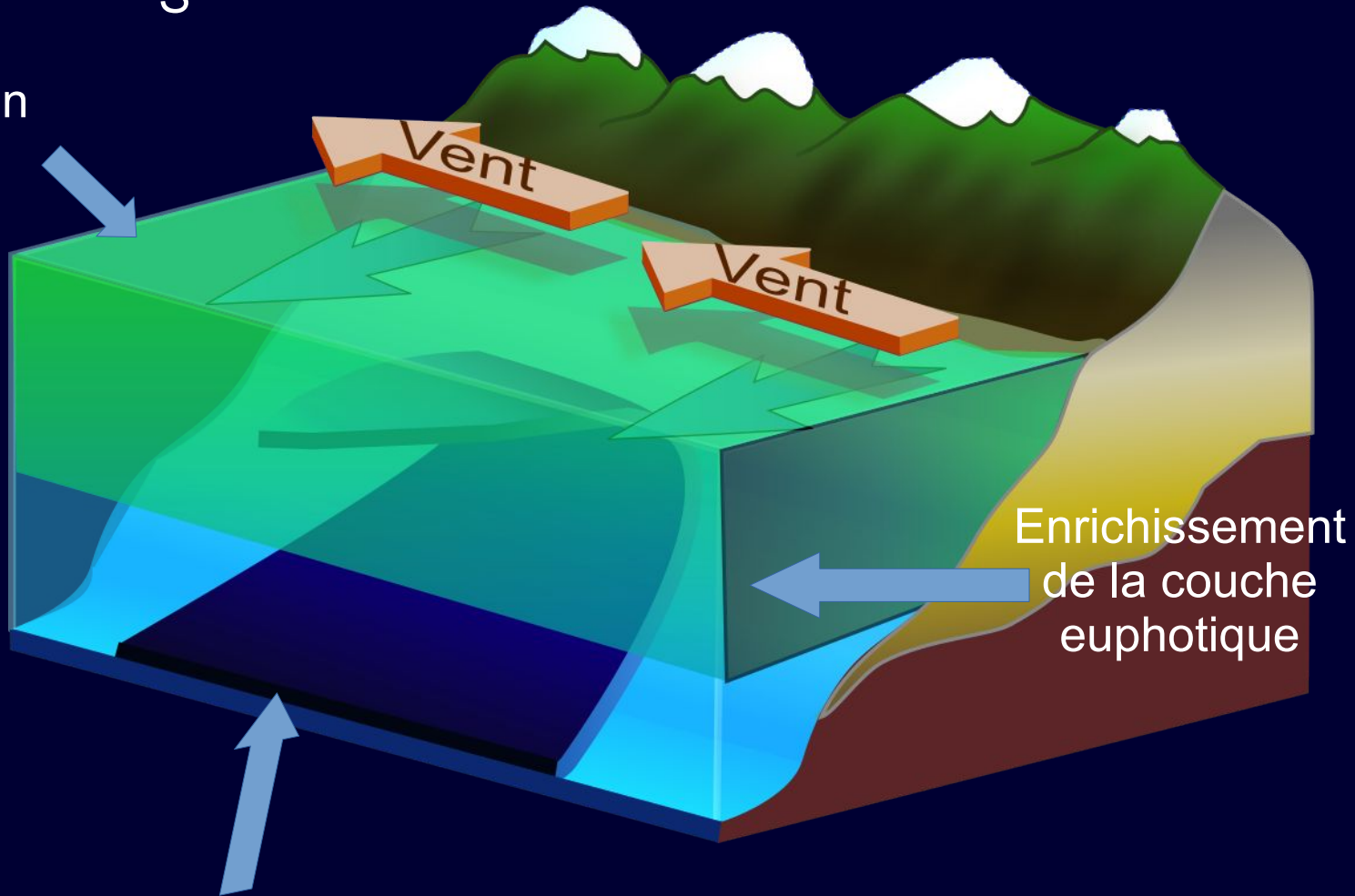


Création d'un « Upwelling »
(remontée d'eau)

Upwelling dans l'hémisphère sud



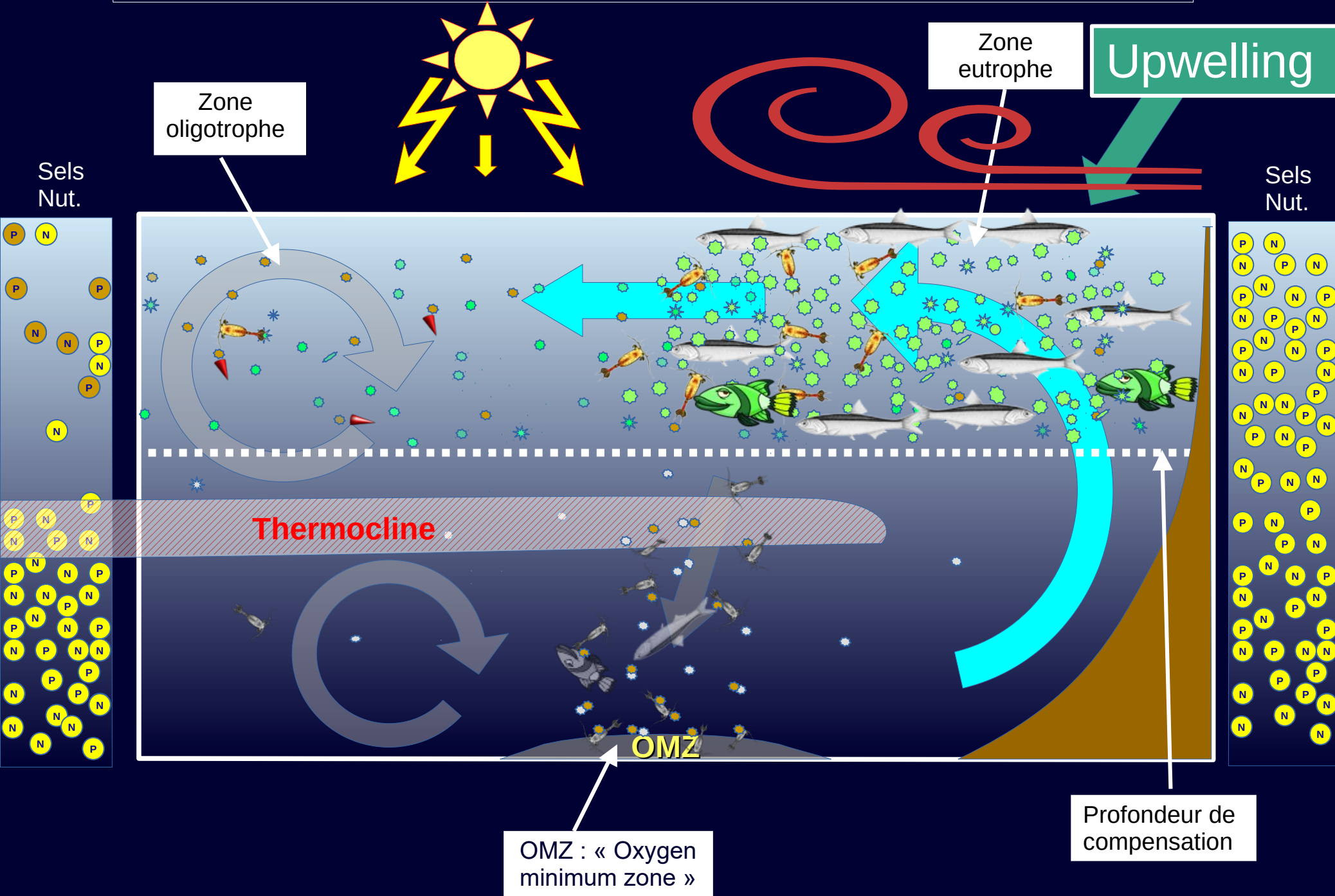
Production
primaire
élevée



Enrichissement
de la couche
euphotique

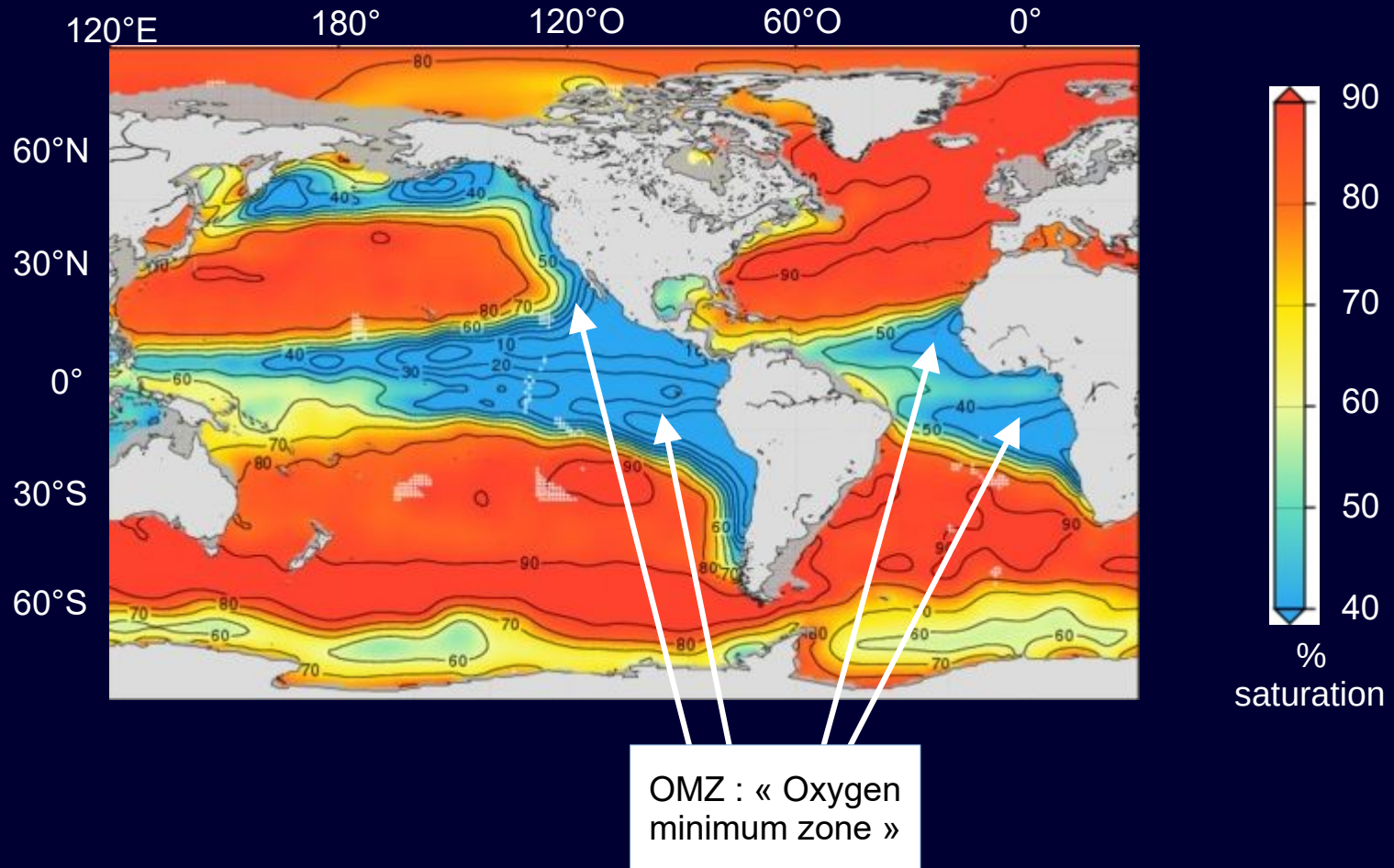
Remontée d'eau profonde
riche en sels nutritifs

Forçage externe (vent) crée une dynamique qui va entraîner un mélange localisé des deux couches.



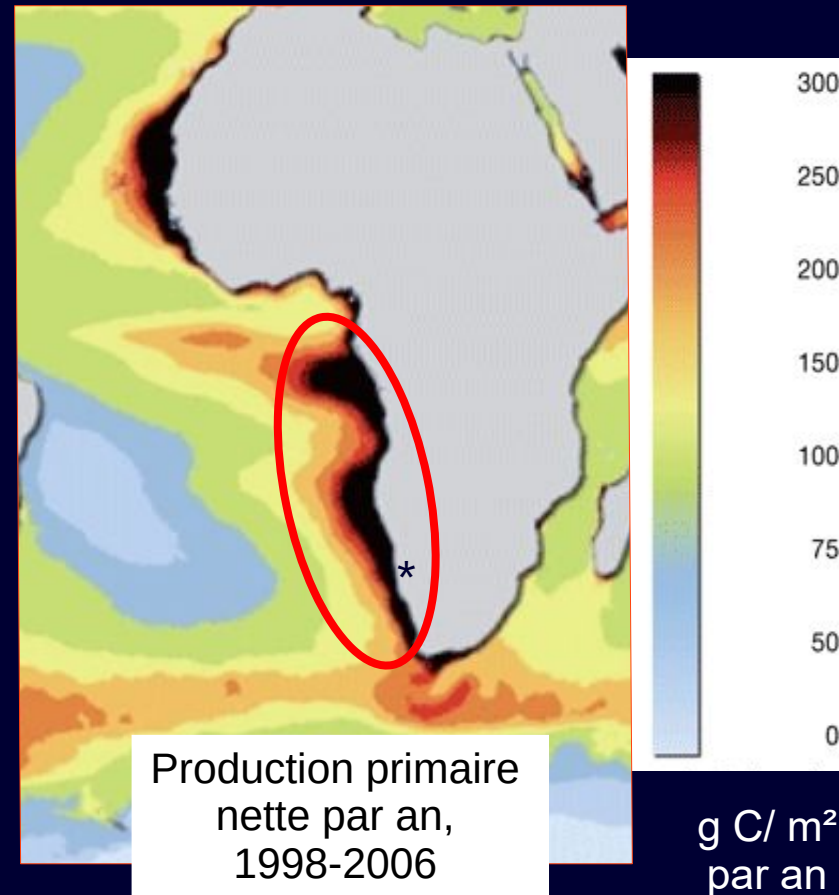
OMZ : « Oxygen minimum zone »

Moyenne annuelle de l'oxygène à 200 m (% de saturation)



Upwelling du courant du Benguela

Production phytoplanctonique



Deux sous-écosystèmes : nord (sud de l'Angola et Namibie) et sud (ouest et sud de l'Afrique du Sud) séparés par la cellule permanente d'upwelling de Lüderitz *.

Pêche : actuellement autour de 2 millions de tonnes, dans les années 70 entre 4 et 5 millions de tonnes.

Upwelling du courant du Benguela



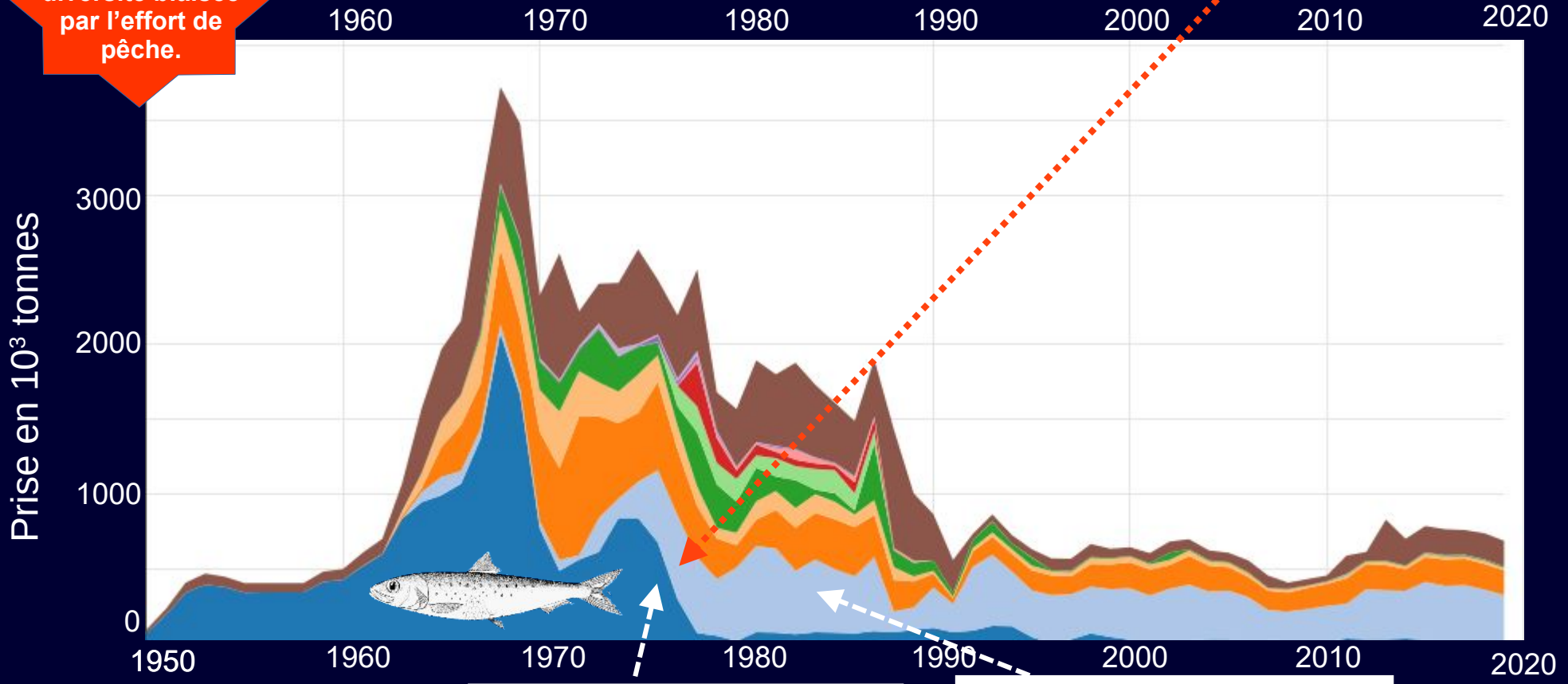
Walvis Bay, Namibie

Upwelling du courant du Benguela (Namibie)

Attention c'est une vue de la diversité biaisée par l'effort de pêche.

Régime shift

Statistique des pêches (Namibie)



Effondrement des populations de Sardine du Pacifique

Développement d'une population de Chinchard du Cap

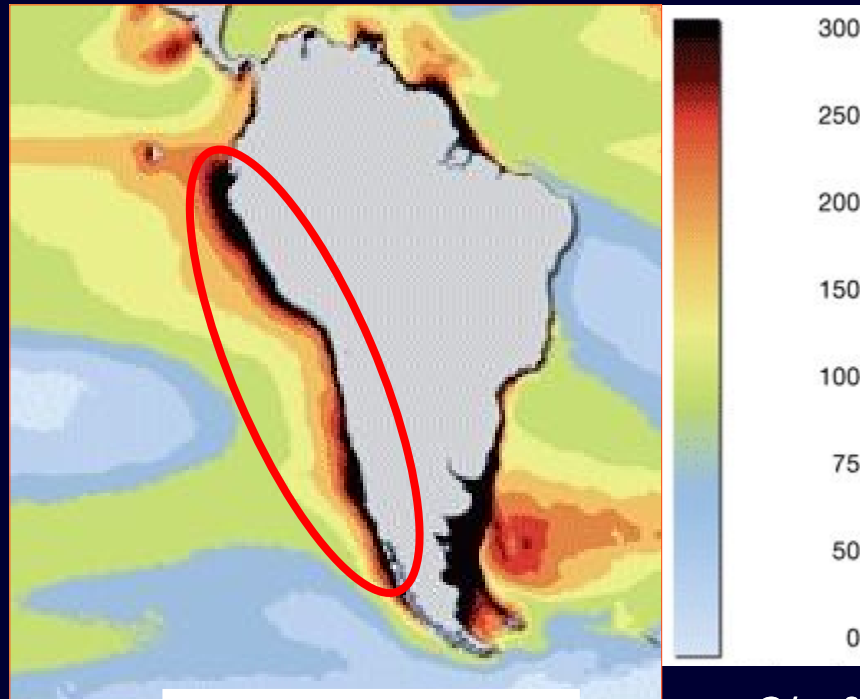


- Sardinops sagax
- Trachurus capensis
- Merluccius
- Lophius vomerinus
- Engraulis capensis
- Sardinella
- Trachurus trecae
- Trachurus
- Dentex macrophthalmus
- Perciformes
- Others

- South American pilchard
- Cape horse mackerel
- Hakes
- Devil anglerfish
- Southern African anchovy
- Sardinellas
- Cunene horse mackerel
- Jacks, horse mackerels
- Large-eye dentex
- Perch-likes
- Others

Upwelling du courant de Humboldt

Production phytoplanctonique



Production primaire
nette par an,
1998-2006

g C/ m²
par an

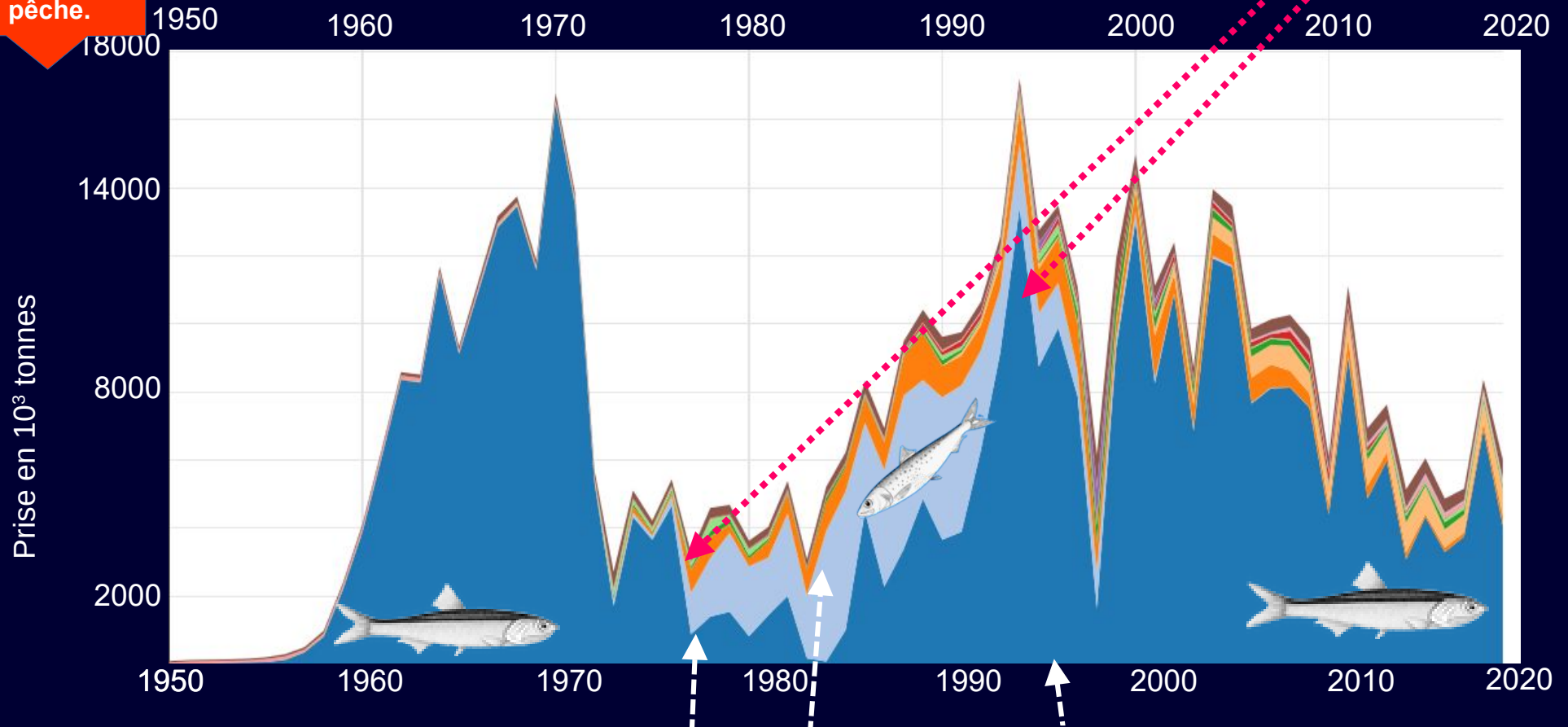
Représentant moins de 1% de la surface de l'océan mondial, il fournit 15 à 20% des captures maritimes mondiales (jusqu'à près de 20 millions de tonnes par an pour le Pérou et le Chili réunis).

Upwelling du courant de Humboldt (Pérou)

Statistique des pêches

«regime shift»

Attention c'est une vue de la diversité biaisée par l'effort de pêche.



Effondrement des populations d'anchois et remplacement par la sardine du pacifique

Rétablissement des populations d'anchois et diminution de la sardine du pacifique

- | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|-------------|
| ● Engraulis ringens | ● Sardinops sagax | ● Trachurus murphyi | ● Dosidicus gigas | ● Scomber japonicus | ● Merluccius gayi peruanus | ● Clupeidae |
| ● Sarda chiliensis | ● Anchoa nasus | ● Katsuwonus pelamis | ● Others | | | |
| ● Anchoveta | ● South American pilchard | ● Chilean jack mackerel | ● Jumbo flying squid | ● Pacific chub mackerel | ● Peruvian hake | |
| ● Herrings, sardines, menhadens | ● Eastern Pacific bonito | ● Longnose anchovy | ● Skipjack tuna | ● Others | | |

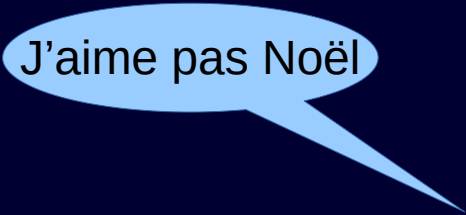
Petit film de l'IRD

Upwelling du courant de
Humbolt

La suite de la suite de l'histoire où on reparle de thermocline, d'Upwelling et où on répond à la question :

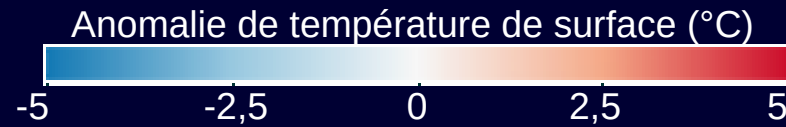
Pourquoi les anchois du Pérou n'aiment pas la période de Noël certaines années ?

L'Oscillation du Pacifique Sud,
le phénomène El Niño (ENSO, El Niño Southern Oscillation)

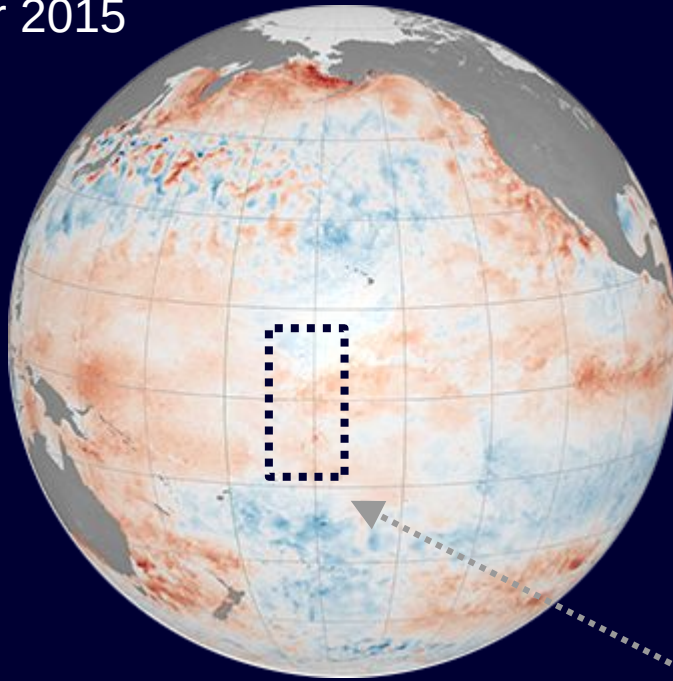


J'aime pas Noël

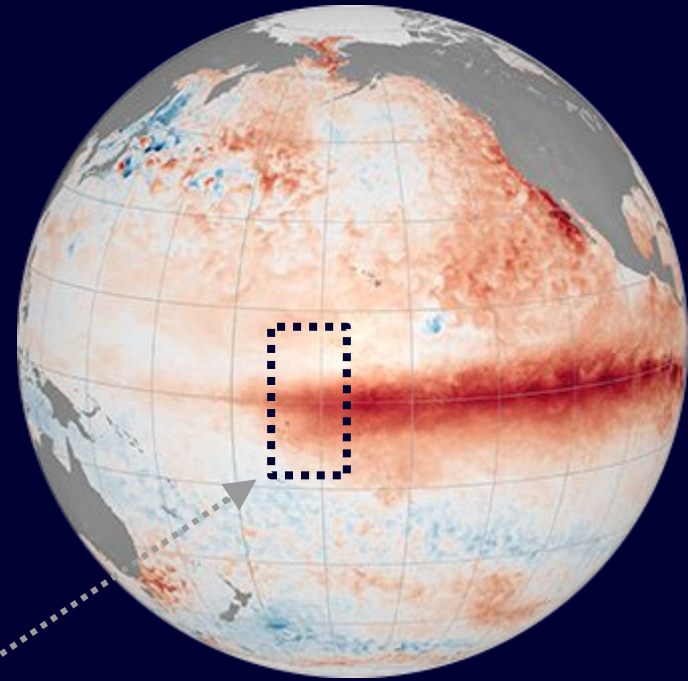
Anomalies de température de surface dans l'océan Pacifique



janvier 2015



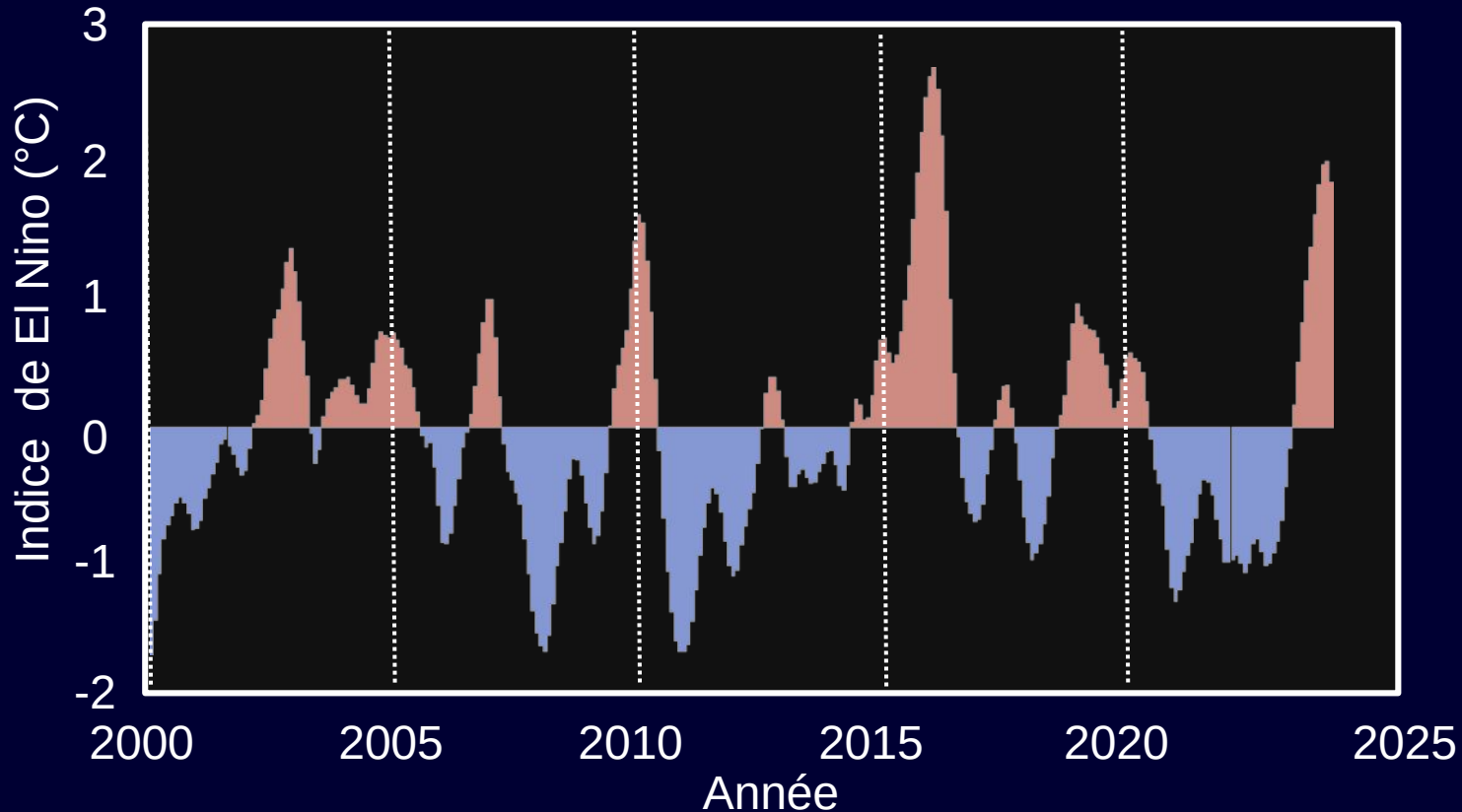
novembre 2015



Zone référence pour l'indice de El Niño
(ENSO, El Niño Southern Oscillation)

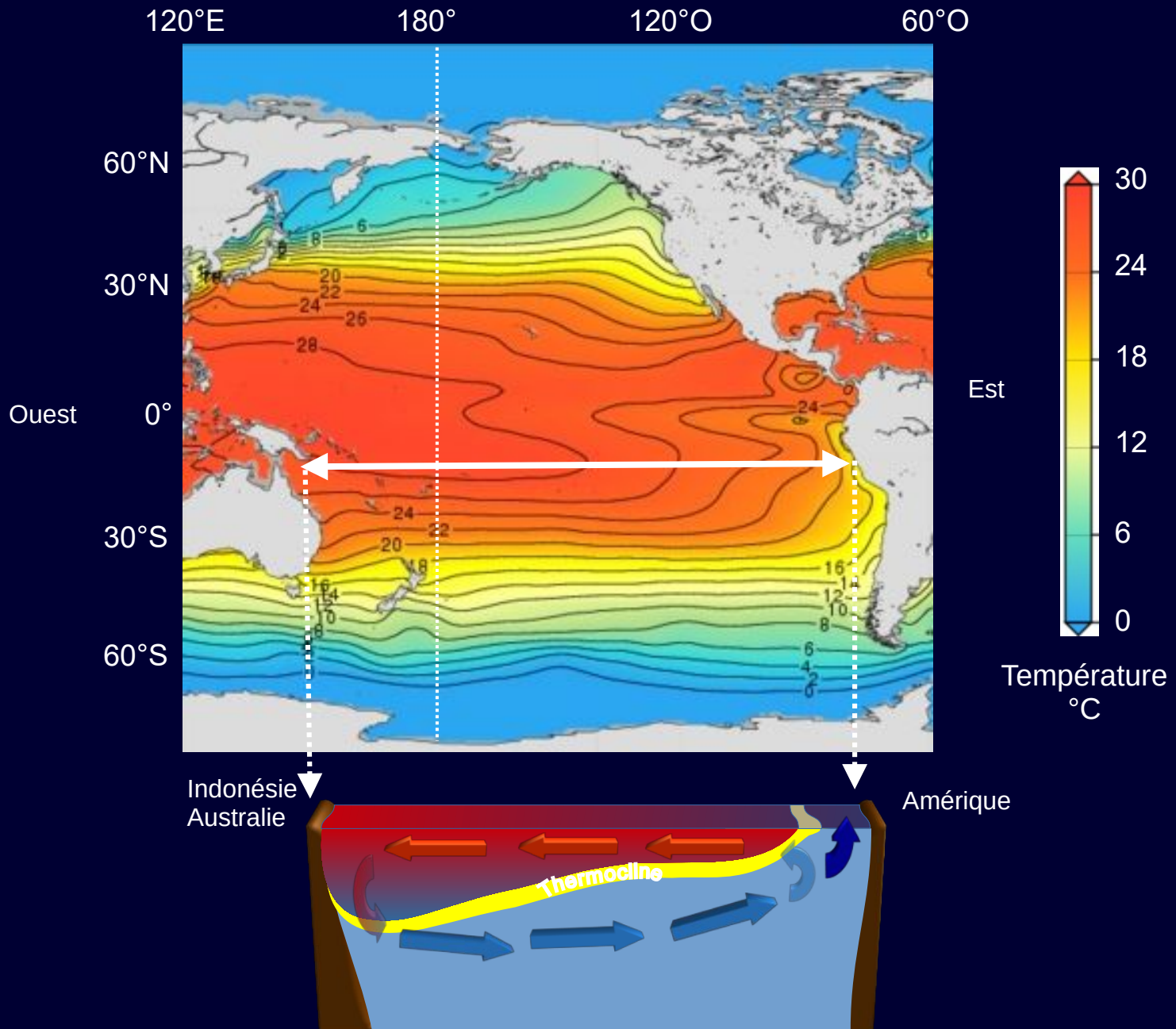
Anomalie : écart à la moyenne calculée sur une période donnée

Anomalies de températures SST par rapport à la moyenne 1981-2010



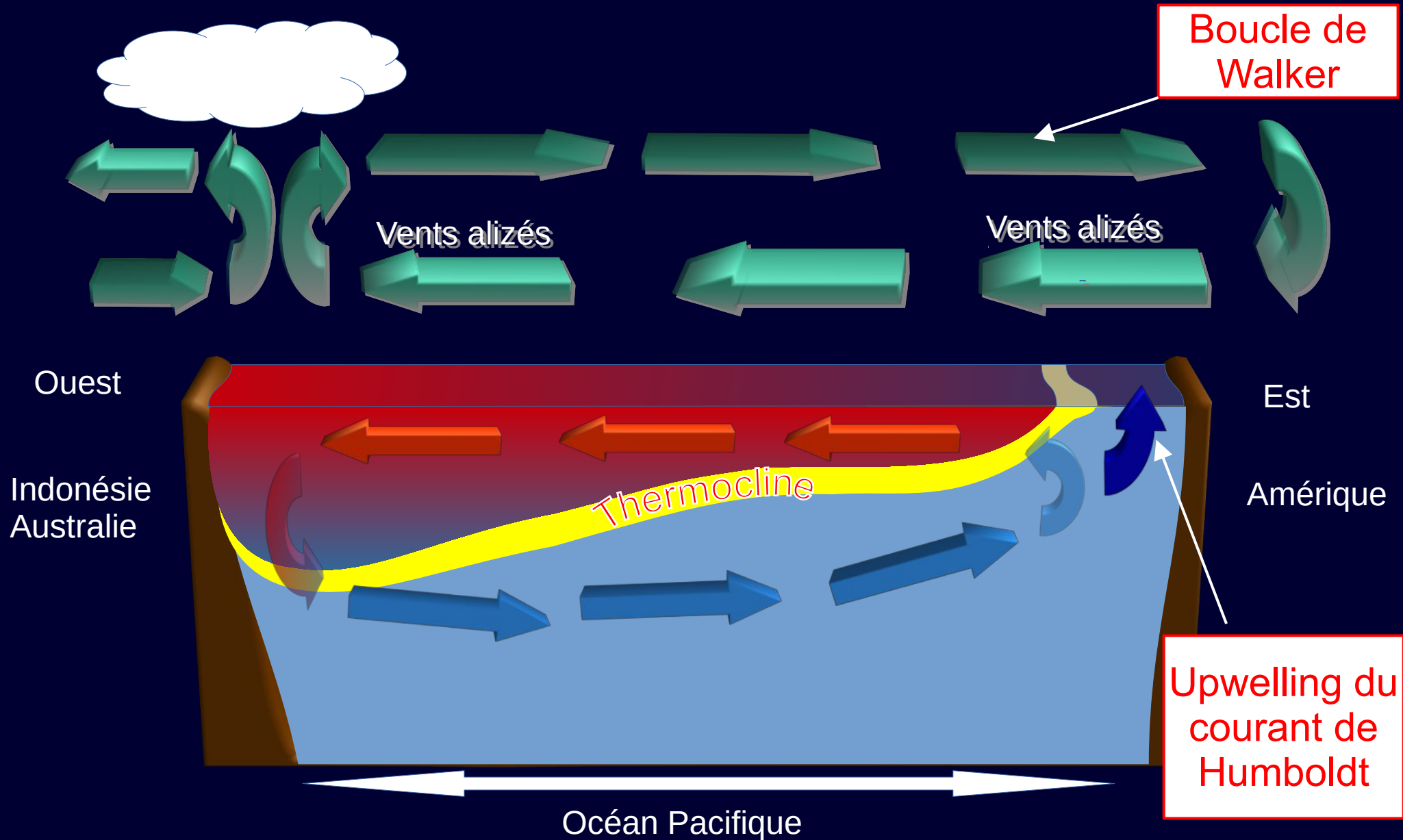
Anomalies trimestrielles de températures SST par rapport à la moyenne 1981-2010
(près de la ligne de changement de date internationale.)

Température de surface (SST en °C)



Oscillation du Pacifique sud, phénomène El Niño

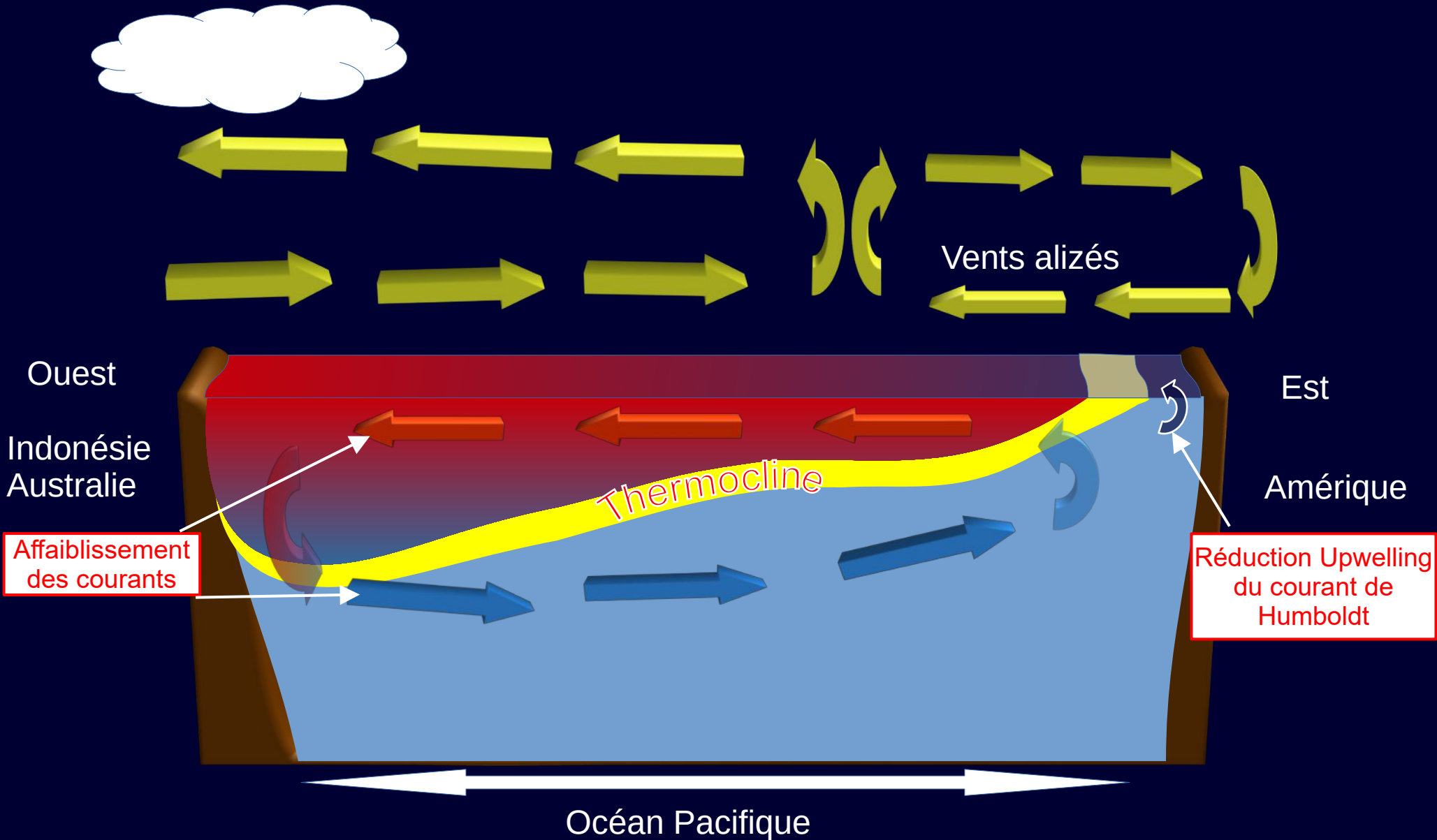
Situation «neutre »



Les événements El Niño apparaissent d'une manière irrégulière, tous les 2 à 7 ans

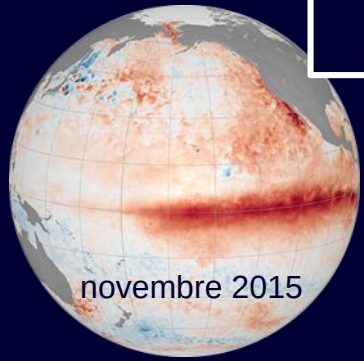
Oscillation du Pacifique sud, phénomène El Niño

Situation Pré-«El Niño»

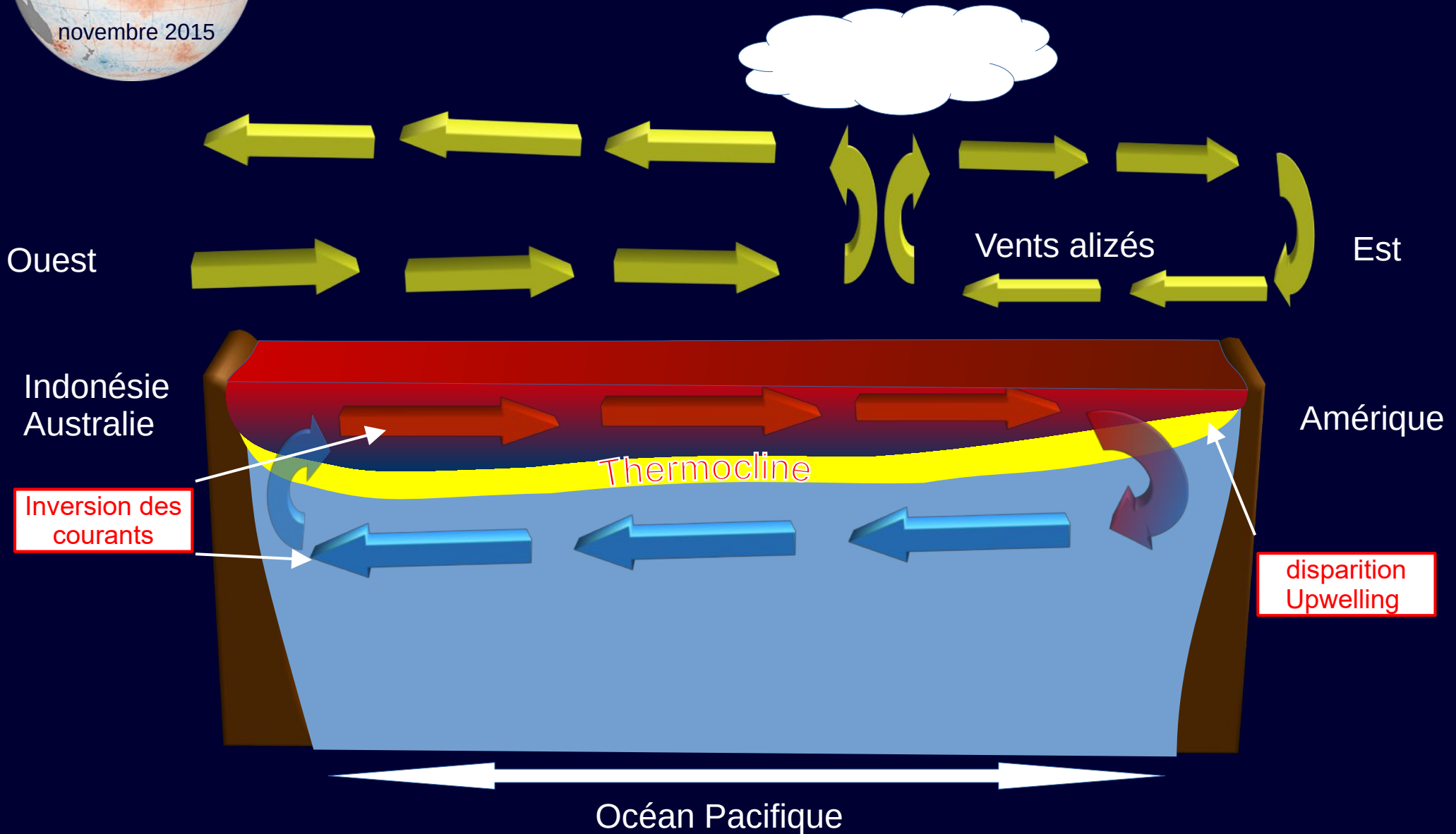


Les événements El Niño apparaissent d'une manière irrégulière, tous les 2 à 7 ans

Oscillation du Pacifique sud, phénomène El Niño



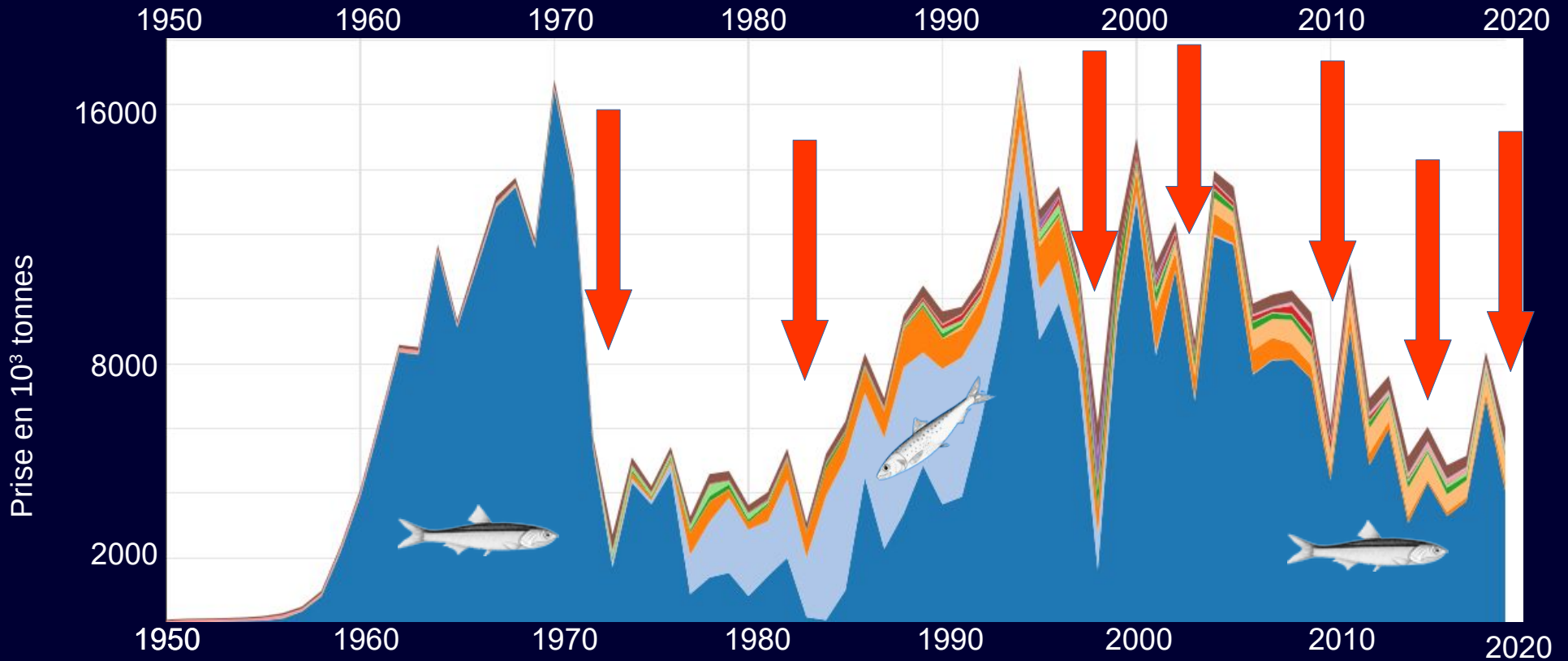
Situation «El Niño»



Les événements El Niño apparaissent d'une manière irrégulière, tous les 2 à 7 ans

Oscillation du Pacifique sud, phénomène El Niño

El Niño de grande intensité :
1972-1973, 1982-1983, 1997-1998, 2002-2005, 2009-2010, 2014-2016, 2019-2020



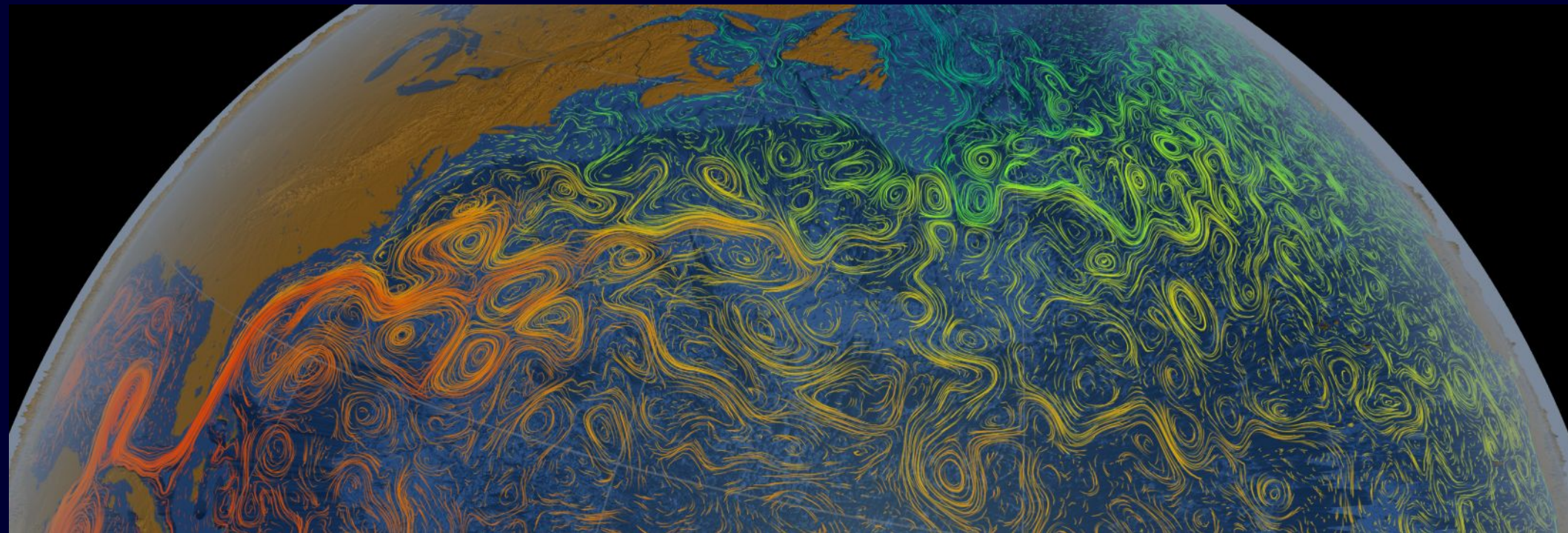
● *Engraulis ringens* ● *Sardinops sagax* ● *Trachurus murphyi* ● *Dosidicus gigas* ● *Scomber japonicus* ● *Merluccius gayi peruanus* ● *Clupeidae*
● *Sarda chiliensis* ● *Anchoa nasus* ● *Coryphaena hippurus* ● *Others*

Statistiques de pêche de : Sea Around Us, University of British Columbia, <http://www.seaaroundus.org/>

Donnée des El Niño de grande intensité : https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Mésoéchelle

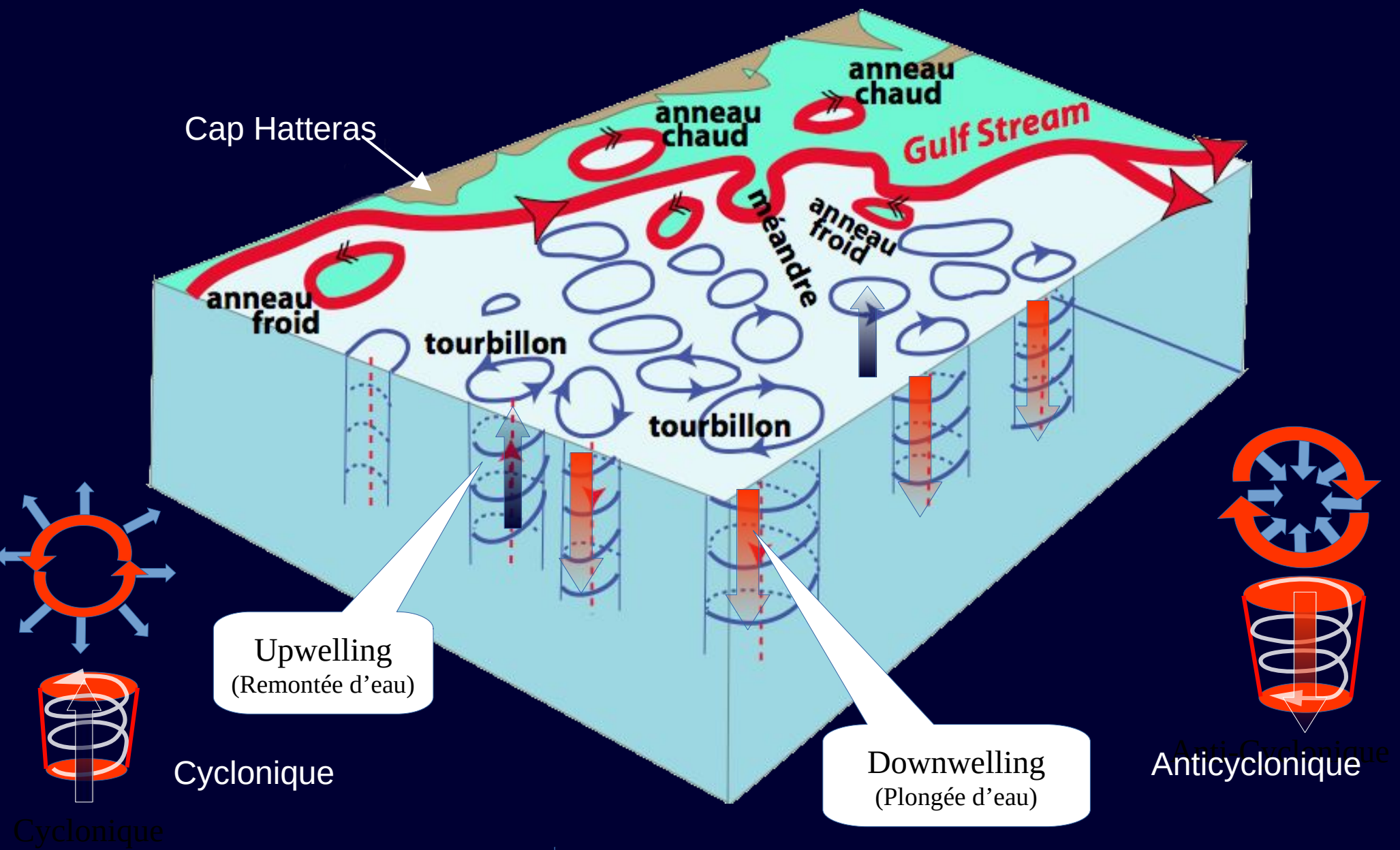
Ou encore : de l'importance des mouvements verticaux dans l'océan



Gulf_Stream_Sea_Surface_Currents_and_Temperatures_NASA_SVS.jpg

<https://svs.gsfc.nasa.gov/3913>

Méandres, anneaux et tourbillons du Gulf Stream



Cap Hatteras

anneau froid

anneau chaud

anneau chaud

Gulf Stream

méandre

tourbillon

tourbillon

Upwelling
(Remontée d'eau)

Downwelling
(Plongée d'eau)

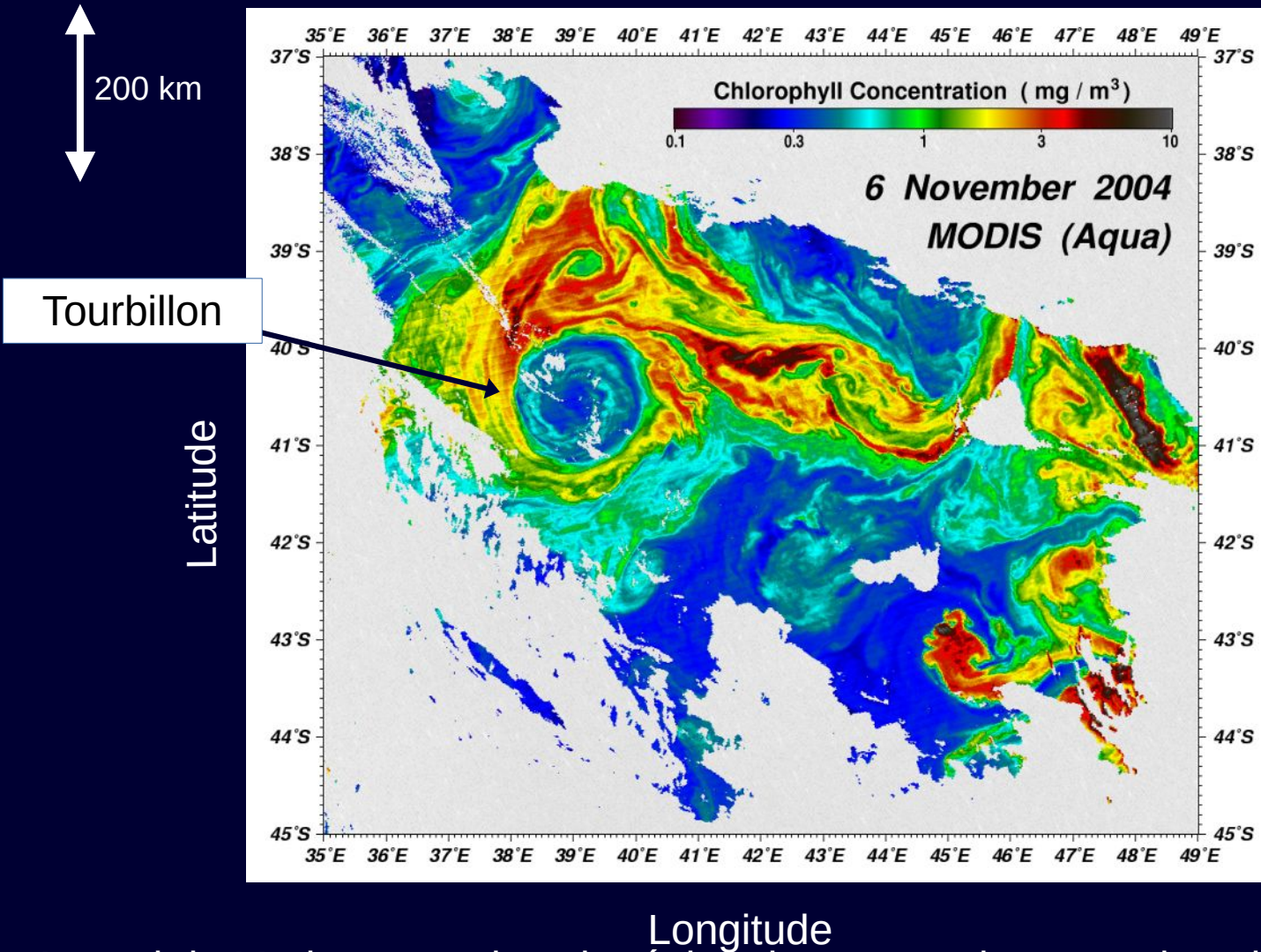
Cyclonique

Anticyclonique

Cyclonique

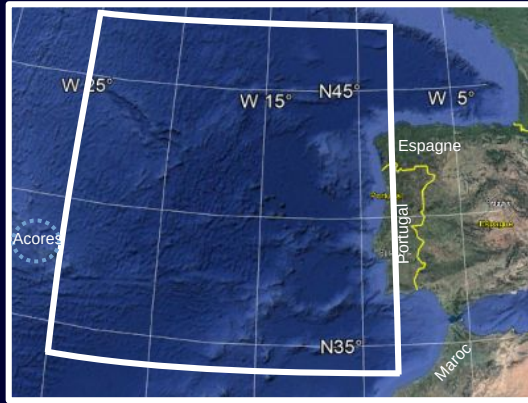
Tourbillons et production primaire au sud de Madagascar

Distribution de la chlorophylle



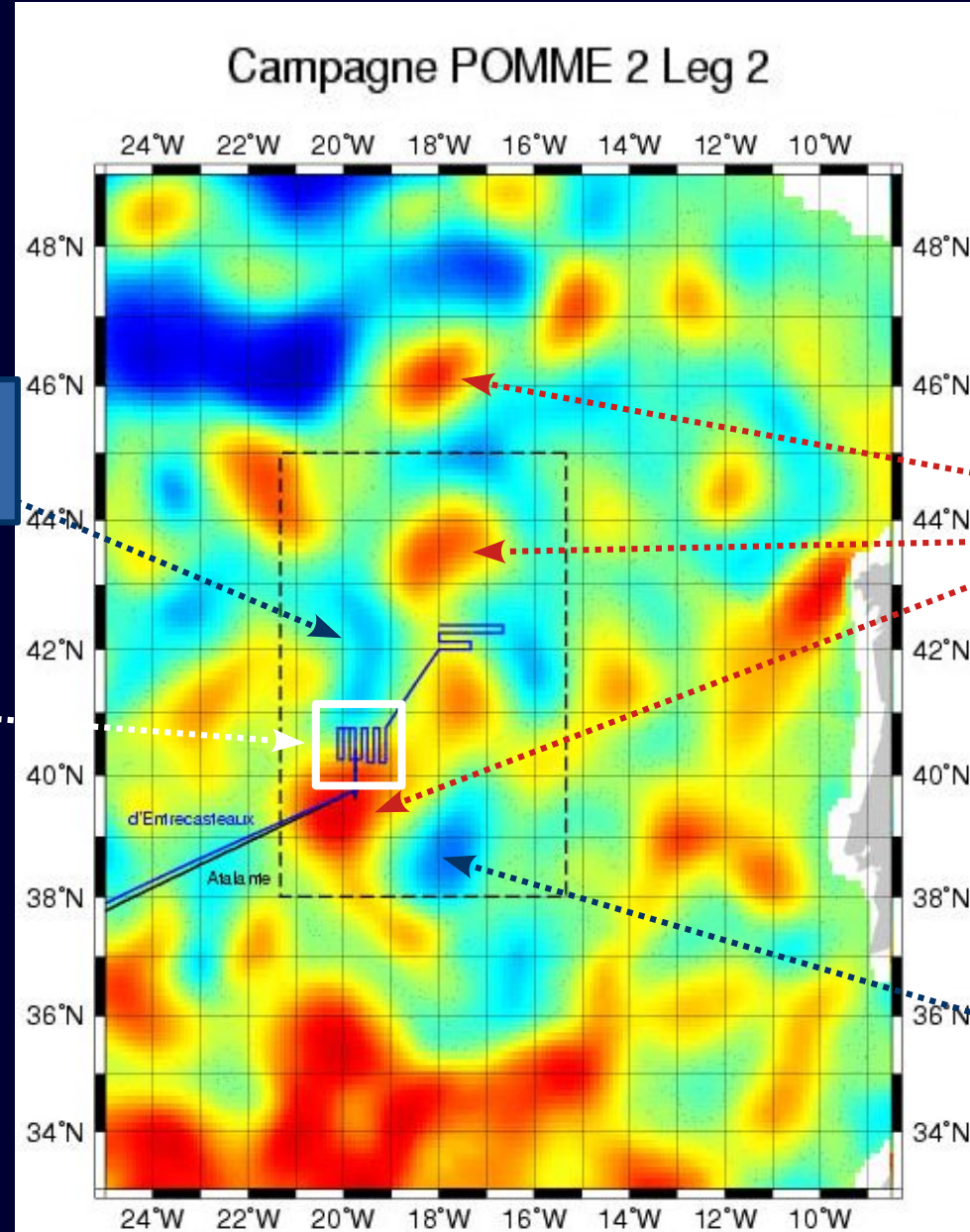
Au sud de Madagascar dans la région du courant de retour des Aiguilles

Systeme mésoéchelle, Atlantique nord-est



Tourbillon cyclonique

Zone d'étude

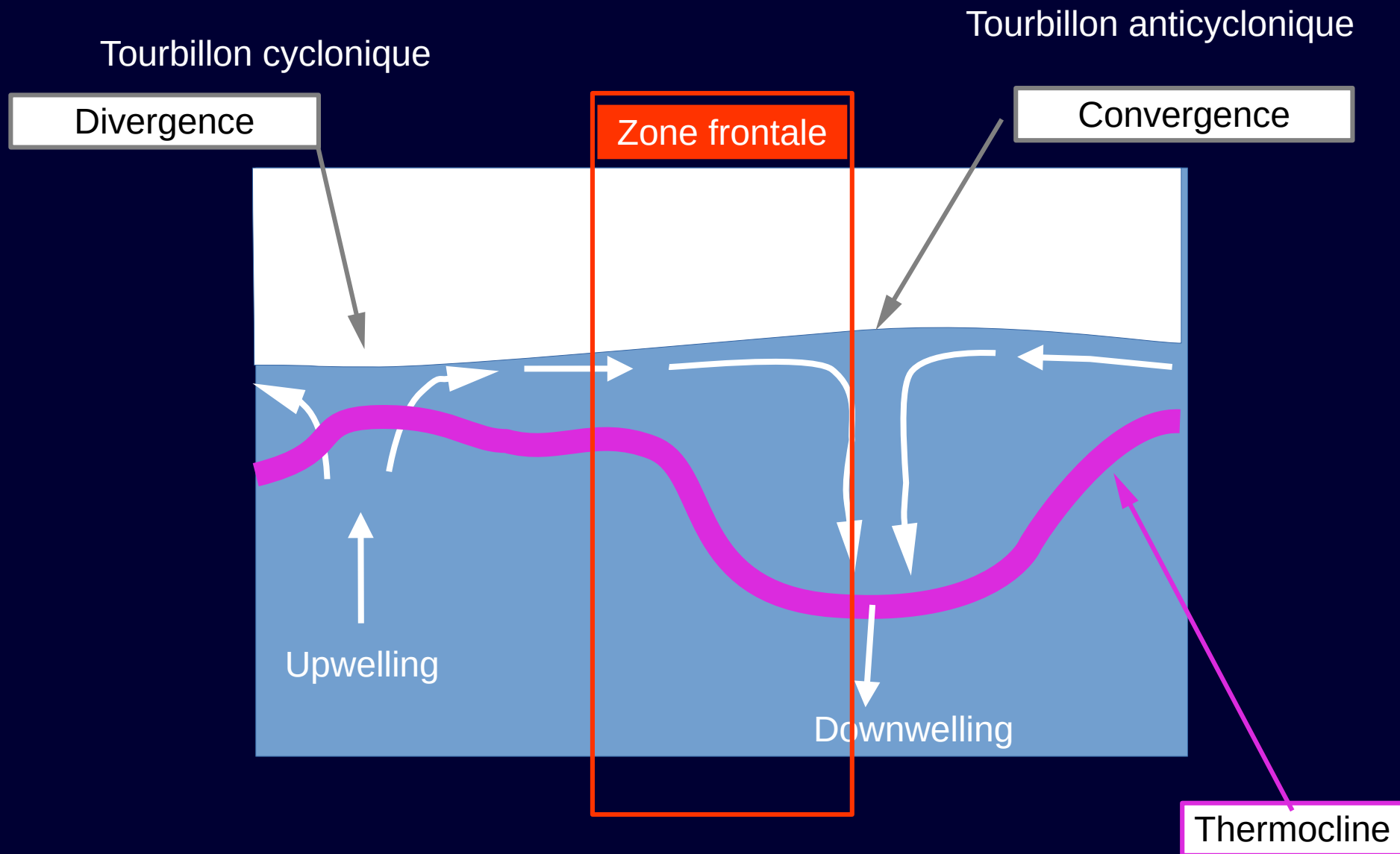


Tourbillon anticyclonique

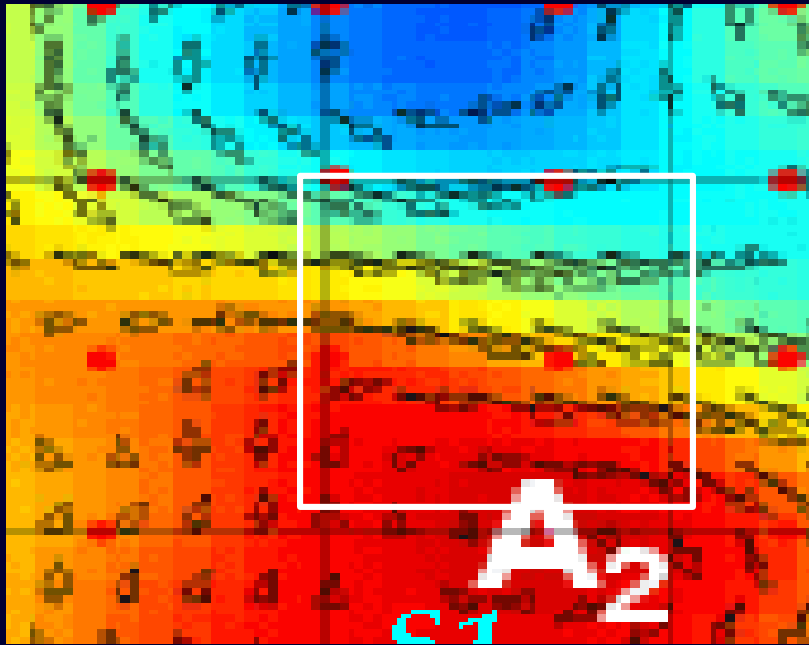
Tourbillon cyclonique

360 nm \approx 666 km

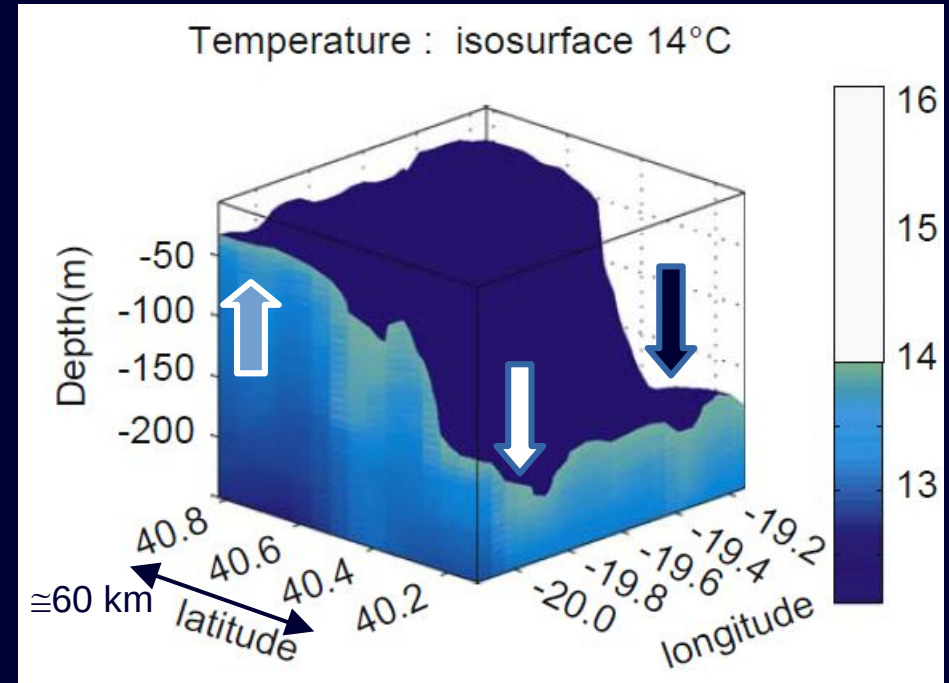
Front entre un tourbillon cyclonique et un anticyclonique



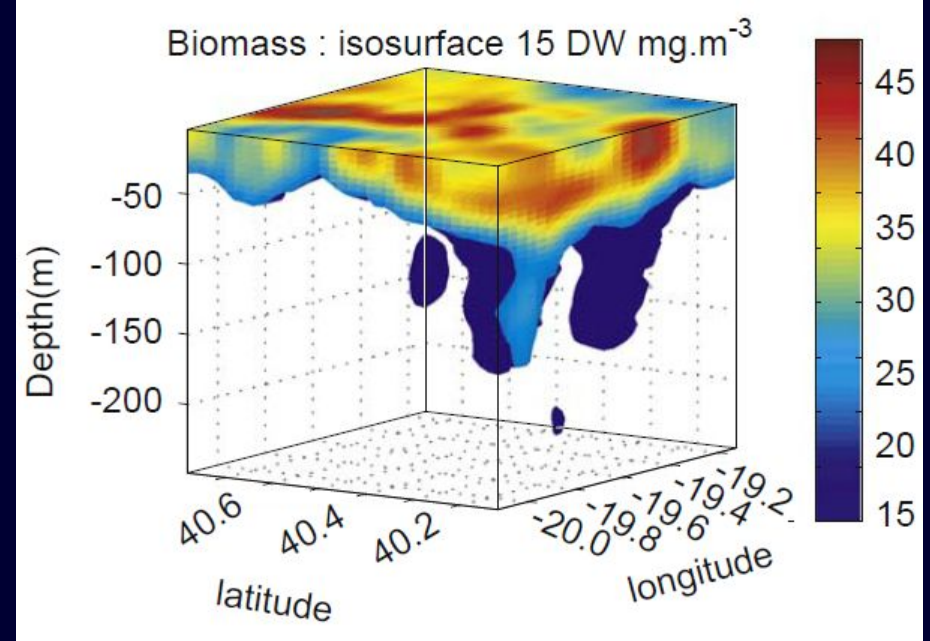
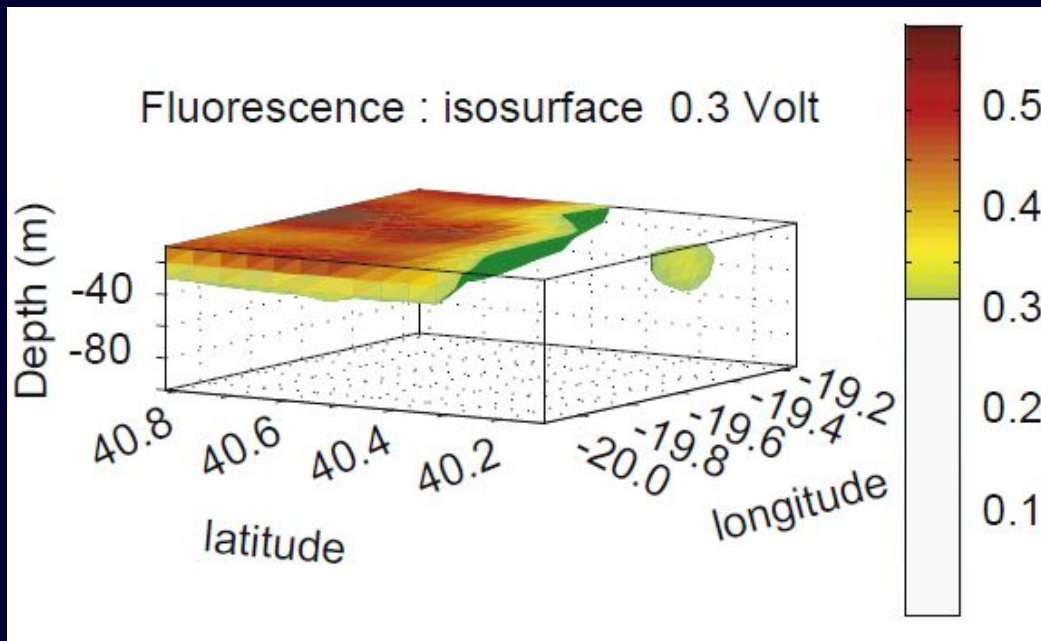
Front entre un tourbillon cyclonique et un anticyclonique



Phytoplankton

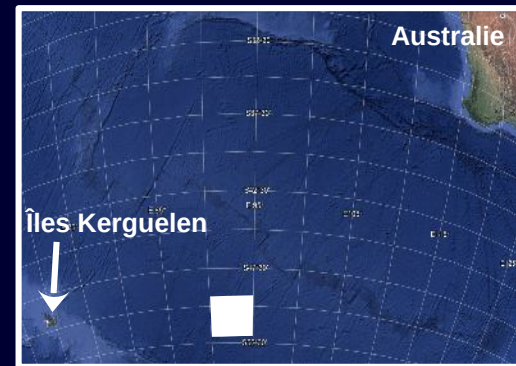


Zooplankton

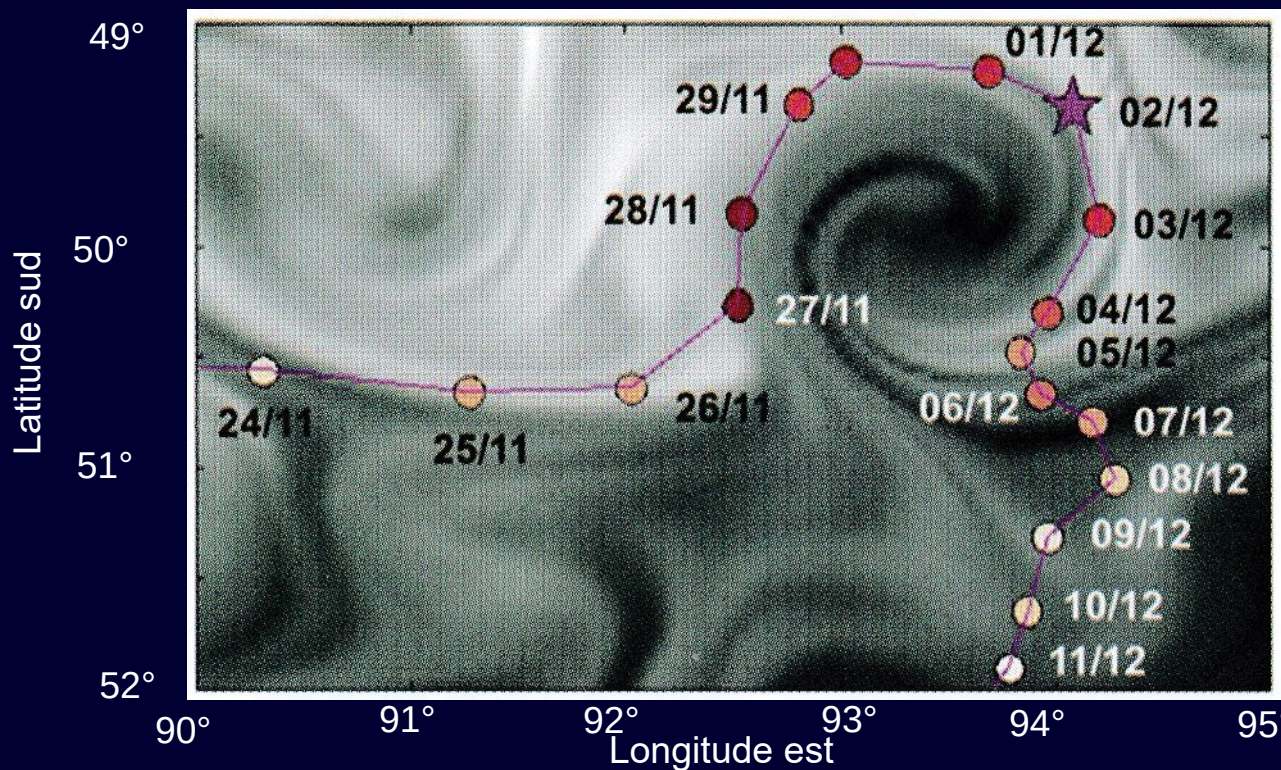




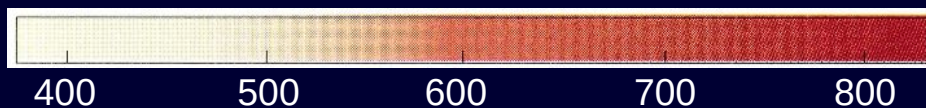
Comportement trophique d'un éléphant de mer dans un tourbillon du courant circumpolaire



100 km



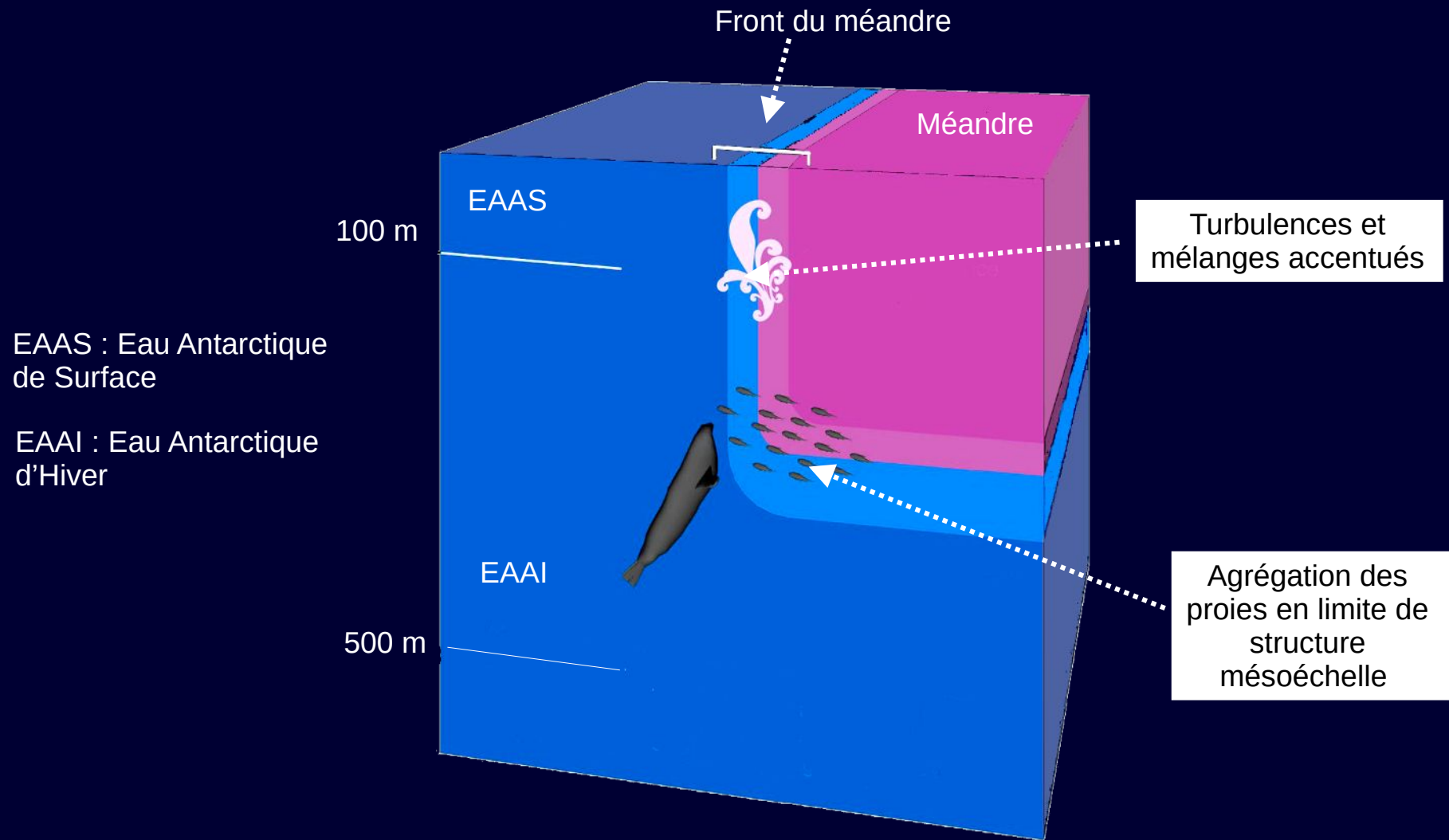
Température (°C)



Nombre de tentatives de captures de proies par jour d'un éléphant de mer dans une structure tourbillonnaire.



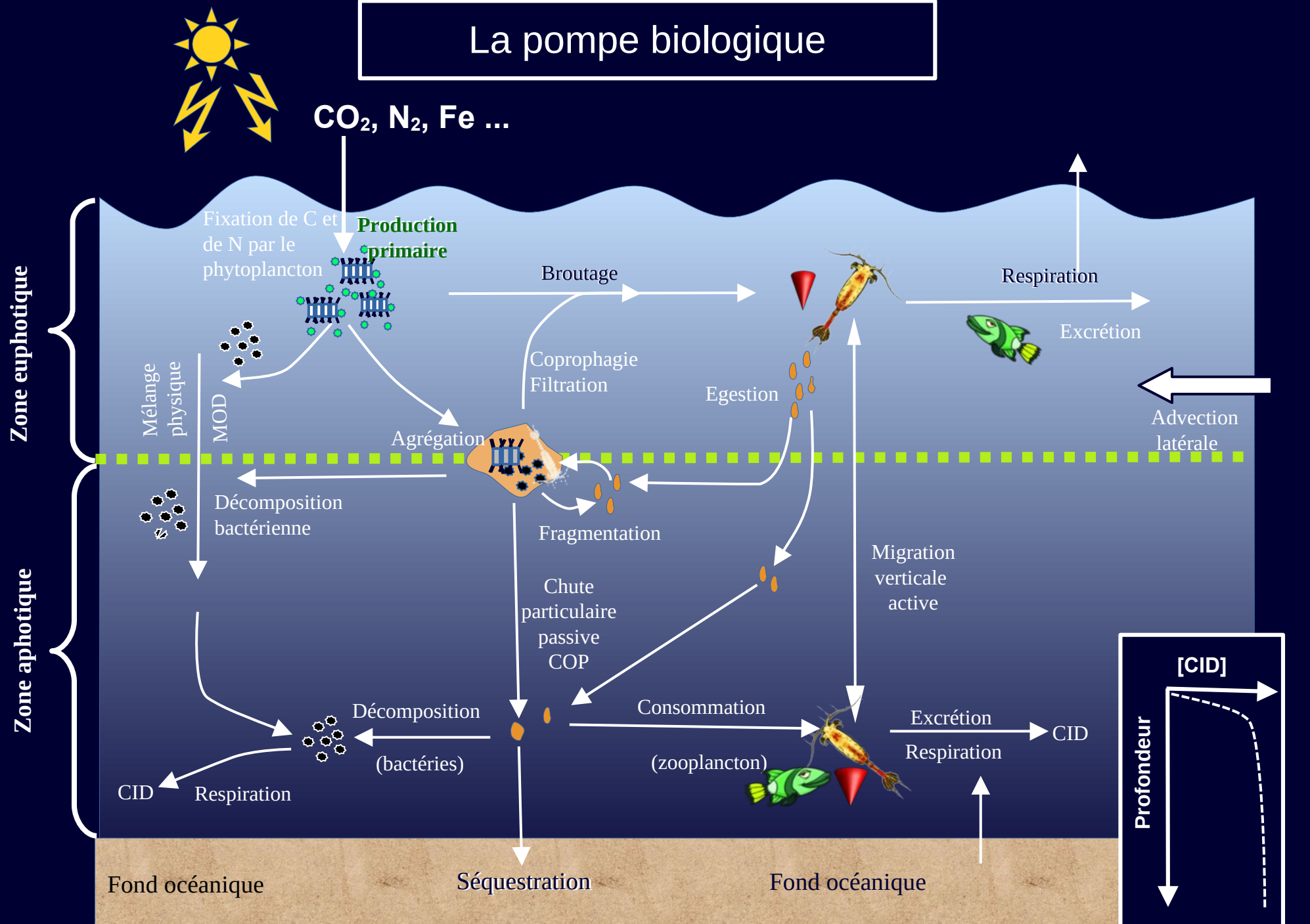
Comportement trophique d'un éléphant de mer dans un tourbillon



Ce qu'il faut retenir sur la dynamique de l'océan à mésoéchelle

- Des tourbillons, fronts filaments forment des structures de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres à la centaine de km.
- Elles vont créer une dynamique de l'océan avec notamment des mouvements verticaux sur plusieurs centaines de mètres.
- Ces structures vont moduler la production des océans notamment en fonction de ces mouvements verticaux.

La pompe biologique



COP : Carbone organique particulaire,
MOD : Matière organique dissoute
CID : Carbone inorganique dissous

Adapté et traduit de : Ducklow H., et al. Upper Ocean Carbon Export and the Biological Pump. *Oceanography* 14, 50–58 (2001).