

L'océanographie, une science en évolution

L'OCÉANOGRAPHIE

UNE SCIENCE EN ÉVOLUTION



Exposition réalisée par



Conception : J. CITEAU , M. BODIN ,
P. MALIET , M. HIGNETTE , M. KAROUNE

Fête de la Science 2024

ArmorScience, Pôle Phoenix, Route du Radôme - 22560 Pleumeur-Bodou
contact@armorscience.com <https://armorscience.org>



L'Océan Mondial

L'océan mondial représente 71% de la surface de la Terre.

Le planisphère ci-contre, montre que l'usage l'a décomposé en cinq océans.



- Il absorbe une grande quantité de l'énergie solaire, captée dans la zone intertropicale.
- Il stocke et redistribue cette énergie vers les pôles grâce à la circulation océanique.
- Il régule le climat et atténue les variations extrêmes de température.
- Il alimente en eau douce les continents (évaporation et création de nuages).
- Il échange de l'énergie avec l'atmosphère (convection, évaporation, courants ascendants et courants descendants).
- Il absorbe du gaz carbonique présent dans l'atmosphère et libère une grande quantité d'oxygène produite par le phytoplancton lors de la photosynthèse.
- Il intègre du carbone, issu du CO_2 dissous, dans la chaîne alimentaire marine.

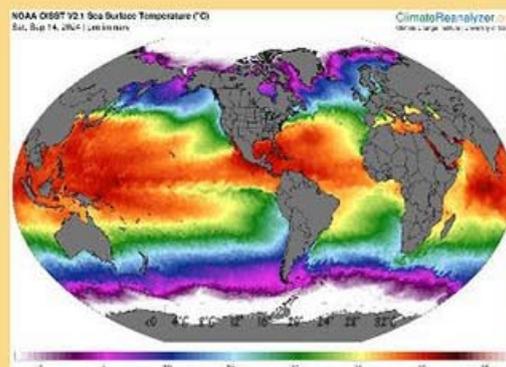
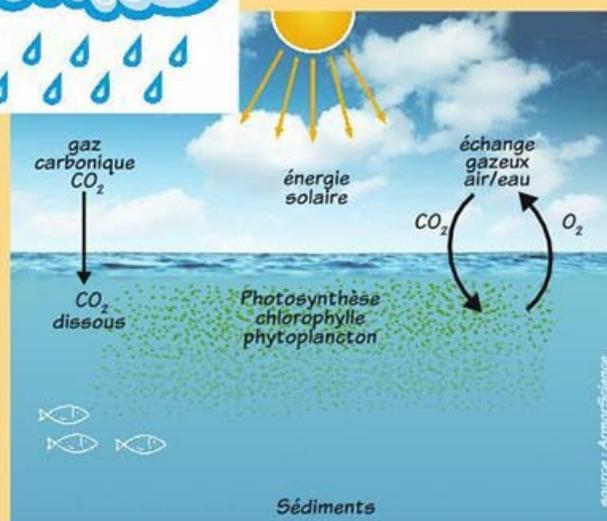


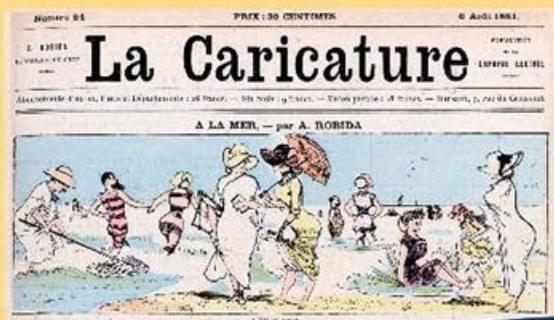
Fig 1 : L'interaction des océans tropicaux avec l'atmosphère.



Mais aussi

Il abrite des millions d'espèces animales et végétales.

Il participe aux activités de tourisme et de loisirs.



Il facilite les échanges commerciaux entre les continents.



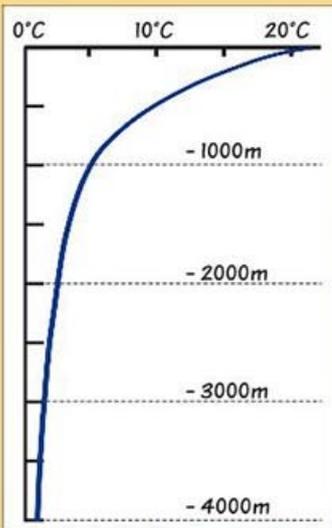
L'EAU DE MER

Ses caractéristiques

Les échanges thermiques entre l'eau et l'air et la circulation océanique assurent une régulation thermique de la planète.

L'eau de mer se caractérise par:

La température



La température de l'eau est de 1,5°C à 6000m de profondeur et peut atteindre 30°C dans les eaux de surface à l'équateur. Dans les zones polaires, l'eau de surface peut geler à partir de -1,9°C.

Fig 1 : Exemple de relevé de la température de l'eau en fonction de la profondeur.

La salinité

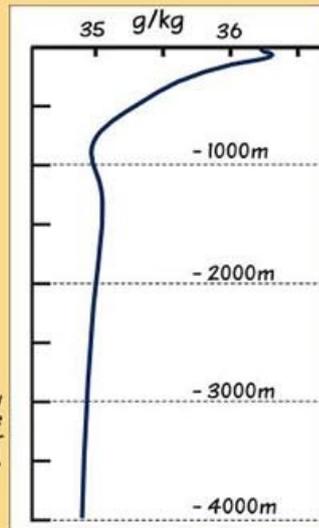


Fig 2 : Salinité de l'eau en fonction de la profondeur (en g/kg).

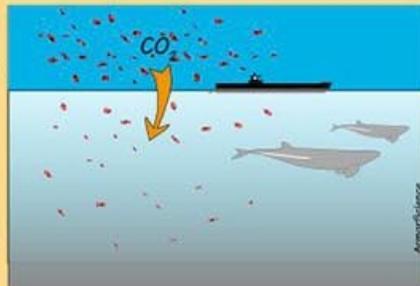


Fig 3 : Marais salants à l'île de Ré.

La quantité de sel (chlorure de sodium) est en moyenne de 35 grammes/kg d'eau de mer (1kg=1000g). On écrit couramment que 5‰ = 35‰.

Les gaz dissous

- **L'oxygène O₂** : indispensable à la vie des organismes marins.
- **Du dioxyde de carbone CO₂** : absorbé par le phytoplancton lors de la photosynthèse.



Energie solaire



Le pH

Actuellement basique. Valeur du pH voisine de 8,2. Une partie du CO₂ dissous se dissocie en acide carbonique, responsable de l'acidification de l'eau de mer. Ceci peut conduire à une difficulté de calcification pour les organismes à coquilles, carapaces ou squelettes calcaires.

La matière organique

La matière organique contenue dans l'eau de mer peut la colorer. Elle contribue à en augmenter la turbidité.

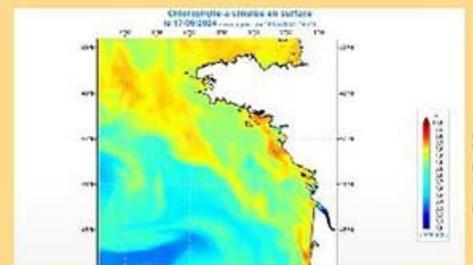


Fig 4 : la chlorophylle en mer, sur la côte ouest de la France.

L'Ifremer surveille l'évolution des efflorescences phytoplanctoniques. En grande quantité, ces microalgues peuvent altérer la couleur de l'eau. **Phytoplancton** : Plancton de nature végétale obtenant son énergie par photosynthèse (Conversion de l'énergie lumineuse en aliments)

Température (T °C) et salinité (S ‰) déterminent la densité de l'eau de mer. Les différences de densité entre masses d'eau engendrent naturellement une circulation (dite thermo-haline).



L'EAU DE MER

Les mesures à la mer

Avec la Bathysonde

Historiquement les mesures à la mer étaient faites avec différents instruments embarqués, la bathysonde en réunit quelques-uns.



Fig 1 Bathysonde utilisée par IFREMER

La BATHYSONDE est une pièce fondamentale de l'armement d'un navire océanographique : elle permet la réalisation de profils verticaux de température, de salinité et d'oxygène dissous, de la surface à des profondeurs de plus de 1500m.

La Bathysonde mesure :

- ➡ La température de l'eau
- ➡ La conductivité de l'eau
On en déduit la salinité.
- ➡ La concentration en gaz dissous:
- Oxygène
- ➡ La pression.

Les «_bouteilles_» disposées autour de la bathysonde sont destinées à la collecte d'échantillons, en vue de mesures à effectuer à bord (nitrates, phosphates, chlorophylle...)



Fig 2 : Les bouteilles de collecte.

Mesures complémentaires

Selon les campagnes de mesures, il est procédé à :

- ➡ La détermination de la concentration en chlorophylle.
La bathysonde est alors équipée de capteurs de fluorescence.
- ➡ La mesure de la vitesse des courants s'effectue depuis le bord avec un courantomètre à effet Doppler (ADCP).
- ➡ L'évaluation de la biomasse depuis le bord par écho-intégration, à partir des techniques d'imagerie acoustique utilisées pour la pêche.
- ➡ La caractérisation du plancton.
Des filets sont traînés derrière le navire océanographique pour la collecte d'échantillons de plancton.



MESURES SATELLITAIRES

Depuis les années 70, les instruments de mesures embarqués sur les satellites ont révolutionné la connaissance de l'océan.



Fig 1 Satellites météorologiques

Ci-contre, la constellation des satellites dont les données brutes sont reçues au Centre de météorologie spatiale (CMS) de Météo-France à Lannion, données traitées au CMS avant d'être transmises à Météo-France à Toulouse.

Différents types de capteurs existent.

Capteurs passifs

Les capteurs passifs restituent une image dans différentes longueurs d'onde du spectre électromagnétique, du visible à l'infrarouge (les tout premiers capteurs passifs furent des caméras).

Ils ont été exploités sur les satellites NOAA (orbite polaire à 850km) depuis 1970 et sur les satellites géostationnaires (orbite équatoriale à 36000km) depuis 1975 : GOES-W (137°W), GOES-E (75°W) et METEOSAT (0°).

METEOSAT-1, premier satellite européen, a été lancé en 1977.

Les radiomètres permettent de connaître :

- ➔ Les structures nuageuses.
- ➔ La température de surface de la mer (canal infrarouge).
- ➔ La couleur de l'océan en surface (canal visible).
- ➔ Le profil vertical de l'atmosphère à différents niveaux en température et humidité grâce à un "sondeur vertical".



Fig 2 : Exemple de structures cycloniques à l'ouest de l'Irlande

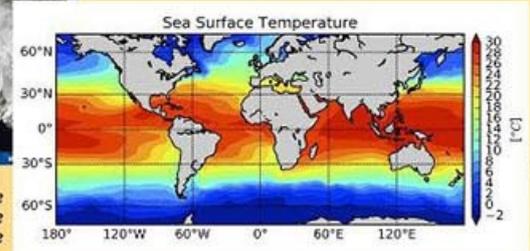


Fig 3 : Carte de température de surface

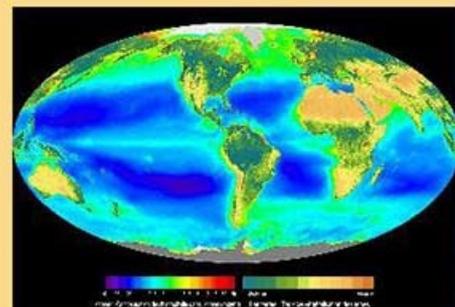


Fig 4 Concentration de chlorophylle dans l'océan et taux de végétalisation des terres.



MESURES SATELLITAIRES

Capteurs actifs

Les capteurs actifs émettent des ondes électromagnétiques (Radar, Lidar, micro-ondes) vers la surface de la mer. Les données rétrodiffusées vers le diffusiomètre ou réfléchies vers l'altimètre permettent de connaître respectivement le vent ou la topographie de la surface de la mer.

➔ DIFFUSIOMETRE :

Le satellite émet des ondes radar vers la surface de l'océan et analyse les ondes rétrodiffusées à partir desquelles sont déterminées :

- la hauteur des vagues,
- la force du vent
- la direction du vent (fig 1).



Fig 1: Vent en Manche et proche de l'Atlantique

➔ ALTIMETRE

Le satellite TOPEX/Poseidon (NASA et CNES) lancé en 1992 avait pour objectif de mesurer la hauteur instantanée de la mer, c'est-à-dire la topographie de la surface de l'océan.

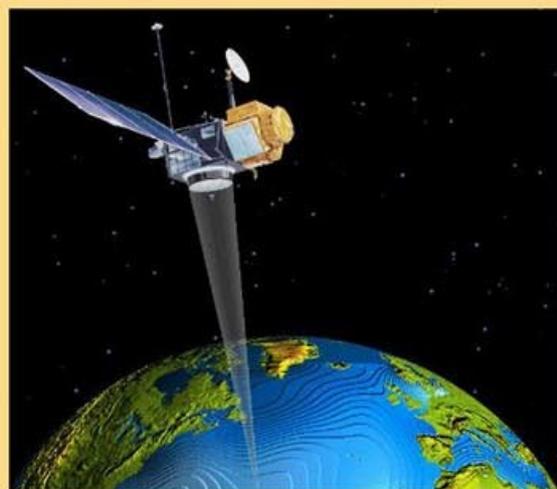


Fig 3 : Le satellite TOPEX/POSEIDON

Un breton directeur du LEGOS *



Fig 2 : Christian Le Provost
Directeur du LEGOS

Les travaux de Christian Le Provost (1997-2004) ont apporté une contribution fondamentale en affinant les modèles de marée, autorisant une précision de l'ordre de 4 cm.

L'Altimétrie est devenue un outil de connaissance de la topographie de la mer et donc de la circulation océanique.

- L'ellipsoïde de référence modélise la forme du globe terrestre. L'ellipsoïde ne modélise pas le relief.
- Le géoïde modélise une surface où tous les points subissent le même effet de gravitation.
- La surélévation de la mer par rapport au géoïde fournit la topographie de la mer.

* Le LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales basé à Toulouse, au sein de l'Observatoire Midi-Pyrénées (Toulouse) est le principal opérateur français exploitant ces données et réunit les compétences d'équipes de recherche (CNES, CNRS, IRD, UT3).

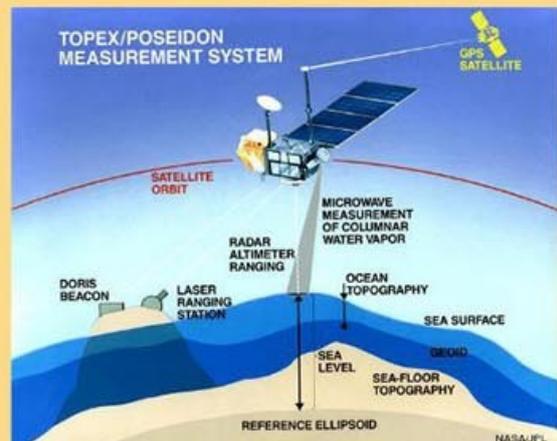


Fig 4 : Principe de la mesure TOPEX/POSEIDON



FLOTTEURS ARGO

Des capteurs plongeurs autonomes

Après les mesures en mer, grâce aux bateaux océanographiques, puis les mesures à partir des satellites (surface de l'océan et caractéristiques de l'atmosphère), de nombreux flotteurs autonomes ARGO sont mis en place pour acquérir des données lors de plongées.

En plus des satellites, une multitude de systèmes de mesures dérivent désormais au gré des courants et fournissent, en temps réel, les caractéristiques de l'eau de mer entre 0m et -6000m.

Le flotteur

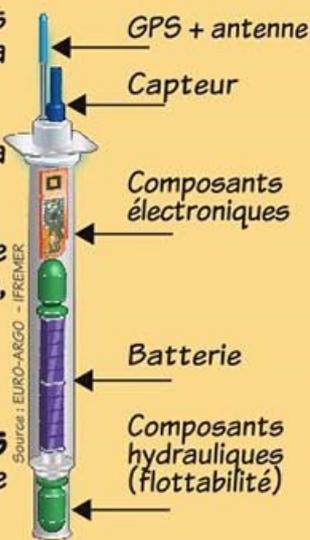
L'antenne transmet les données et récupère la position (GPS).

Les capteurs mesurent la température et la salinité.

Le processeur commande les actions (montée, descente, mesures).

La batterie fournit l'énergie.

Les composants hydrauliques commandent la descente vers les abysses.



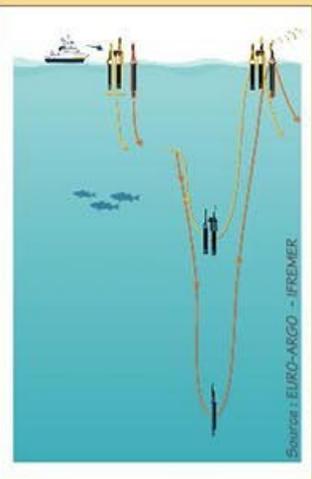
Chaque flotteur est muni de capteurs de température et de salinité, ce qui indique la densité et permet de concourir à la compréhension de la circulation océanique et de son influence sur le climat.



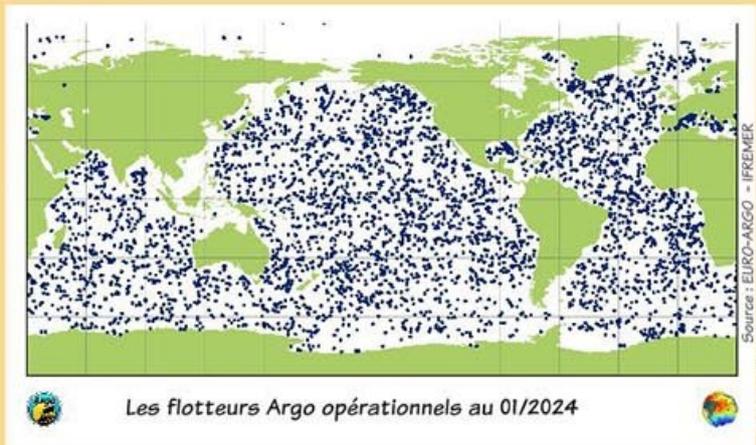
Position

Le planisphère montre la position des 4000 flotteurs profilants déployés dans l'Océan mondial, grâce à l'implication d'une trentaine de pays, dont la France, via son opérateur : IFREMER.

Le cycle



La majorité des flotteurs plongent jusqu'à 2000 mètres de profondeur puis remontent en faisant les mesures qui seront transmises aux satellites lors de leur émergence, avant d'effectuer un nouveau cycle de plongée sur une dizaine de jours.



De nouveaux flotteurs peuvent atteindre des profondeurs de 6000 mètres et être munis de nouveaux capteurs (oxygène, pH, chlorophylle, nitrates...).

Des navigateurs acceptent aussi d'embarquer des flotteurs et de les immerger, notamment lors de courses transocéaniques, là où les missions océanographiques sont rares.



CIRCULATION OCÉANIQUE

Le vent joue un rôle majeur pour la circulation océanique en surface.

En surface

La force de friction du vent sur l'eau crée une force d'entraînement des eaux de surface. Cette force décroît en subsurface, mais reste sensible jusqu'à une certaine profondeur. Les vents comme les courants sont soumis à la force de Coriolis.

En profondeur

À grande échelle, ce sont les gradients de densité qui engendrent une circulation plus lente (circulation thermohaline).

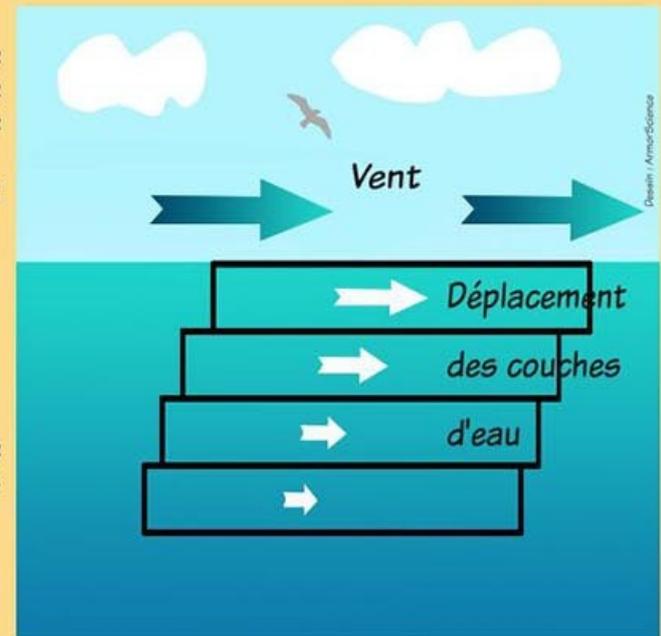


Fig 1 : Plus on s'enfonce dans les profondeurs, moins le vent a d'influence sur le courant.

Le couplage océan-atmosphère

L'océan et l'atmosphère s'influencent mutuellement; ils échangent des flux radiatifs, des quantités de mouvement, de la vapeur et de l'eau.

La force de Coriolis :

Cette force, induite par la rotation de la Terre, impose à tout corps en mouvement, une courbure de la trajectoire initiale vers la droite dans l'hémisphère Nord ou vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

La force de Coriolis dépend de la masse du corps, de sa vitesse et de la latitude. La force est nulle à l'équateur et maximale aux pôles.

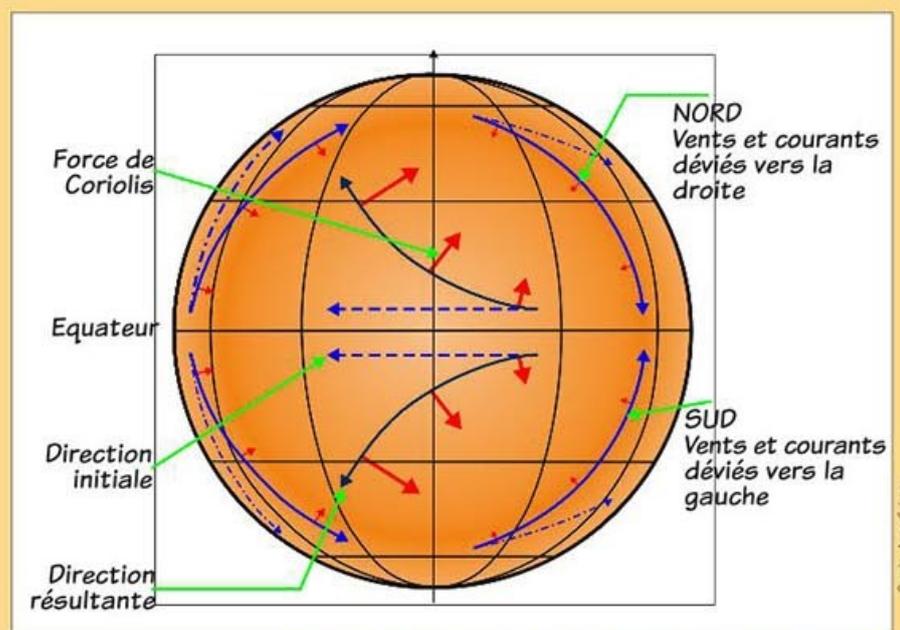


Fig 2 : En pointillé bleu la direction initiale du vent, en rouge la force de Coriolis, en bleu-marine la résultante.



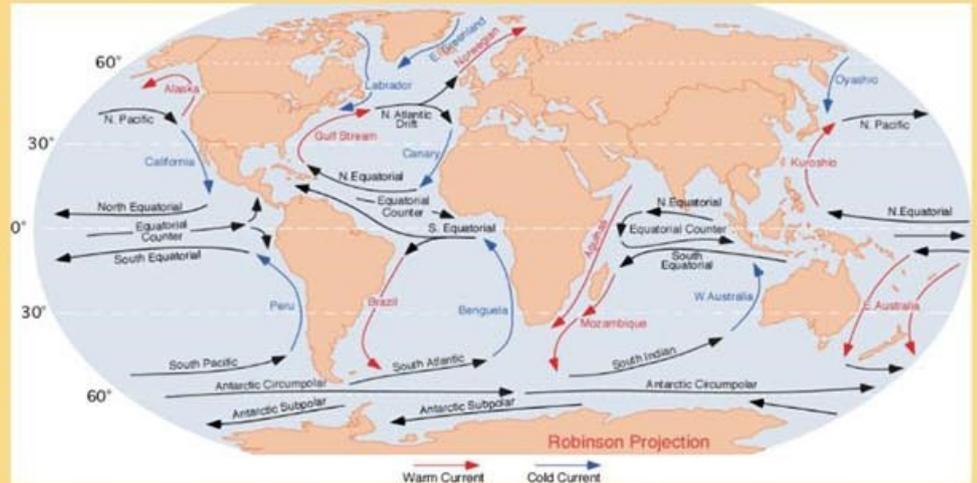
LES COURANTS DE SURFACE

Au-dessus des océans, les champs de pression déterminent les vents et donc les courants à la surface des océans.

Exemple de l'océan Atlantique

En Atlantique Nord, le régime des vents dominants est celui des alizés de NE.

L'ensemble constitué par le courant des Canaries, le courant Nord-équatorial et le Gulf Stream, constitue une boucle ou un gyre anticyclonique.



Les flèches rouges ou bleues (Fig 1) symbolisent des courants chauds ou froids.

Fig 1: Les courants de surface

De même, en Atlantique Sud, les alizés de SE dominant dans l'anticyclone de Sainte-Hélène (fig. 2)

Ainsi, le courant de Benguela, le courant sud équatorial et le courant du Brésil (fig.1) constituent également un gyre subtropical océanique.

Ces gyres océaniques permettent le transport d'énergie thermique vers les régions polaires.

Ce transfert d'énergie, dû à l'océan, est environ 4 fois plus important que celui de l'atmosphère.

Les centres de ces gyres constituent des zones d'accumulation de déchets plastiques.

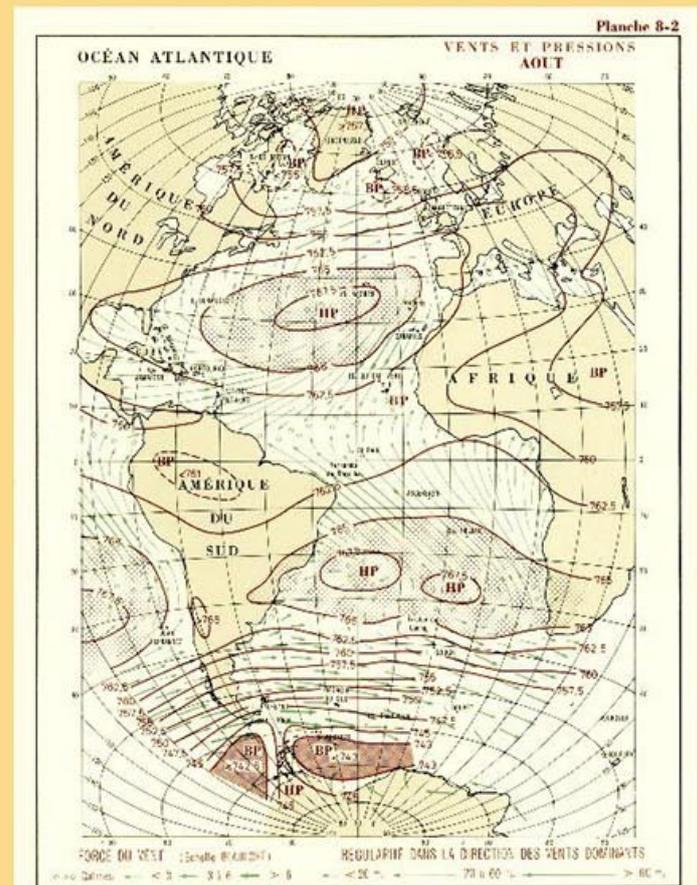


Fig 2 : Champs de pression et Vents en Atlantique.



LE GULF STREAM

Un courant en Atlantique Nord

Le Gulf Stream amène de la chaleur vers le pôle Nord et contribue à adoucir le climat des Iles Scilly, de la Bretagne et même plus au Nord vers la Norvège.

Un courant chaud

Le Gulf Stream, courant océanique chaud, prend sa source entre la Floride et les Bahamas.

Après avoir longé les côtes orientales de l'Amérique du Nord, il se disperse en plusieurs tourbillons (voir fig 2)

Conséquences

- ➡ Ce courant joue un rôle important dans le transfert méridien d'énergie. Il contribue, à une latitude identique, à adoucir les hivers, plus doux en Europe de l'Ouest qu'en Amérique du Nord.
- ➡ Le refroidissement des eaux salées, donc denses, et chaudes du Gulf Stream dans les mers de Norvège et du Groenland induit la plongée des masses d'eau.
- ➡ Le transport d'eaux salées et chaudes jusqu'en mer de Norvège et du Groenland est l'élément déclencheur du "tapis roulant". Aux hautes latitudes le CO_2 se dissout d'autant mieux que la température est froide. Le CO_2 est donc piégé par la plongée d'eaux froides, ce qui entraîne une acidification accrue de l'eau de mer.

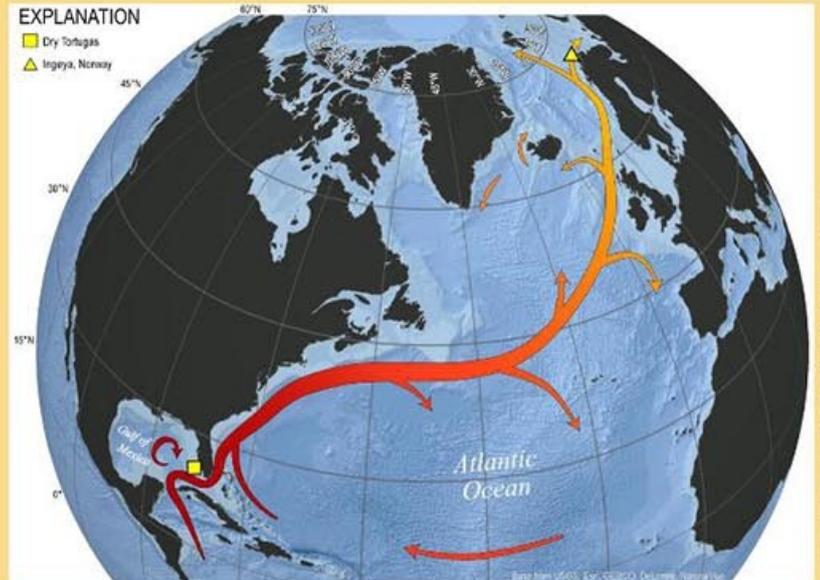


Fig 1: parcours du Gulf Stream

Public Domain. Credit: Madelyn Mette, USGS

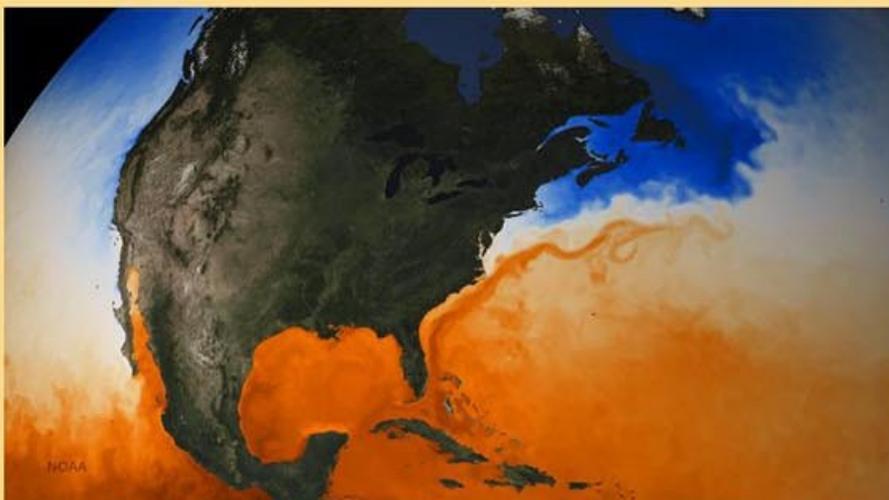


Fig 2 Les méandres du Gulf stream - Température de surface (NOAA/AVHRR)

Caractéristiques

- vitesse moyenne : 1,5 m/s (5,4 km/h)
- débit moyen : 55 million de m^3/s (à comparer au débit du fleuve Amazone : 0,2 million de m^3/s).
- température des eaux transportées : supérieure à 20 °C

Credit: National Oceanic & Atmospheric Administration



L'Océan, un puits de carbone

Le CO_2 , dissous par l'eau de mer, permet le développement du phytoplancton lors du processus de photosynthèse.
Ce CO_2 se dissocie partiellement en acide carbonique, en équilibre avec les bicarbonates et les carbonates.

1^{ère} étape

Le dioxyde de carbone (CO_2) contenu dans l'atmosphère se dissout dans l'eau de mer. La dissolution est d'autant plus importante que celle-ci est plus froide.

2^e étape

Le phytoplancton qui se trouve près de la surface reçoit de l'énergie du soleil. La photosynthèse contribue ainsi au développement des micro-organismes planctoniques.

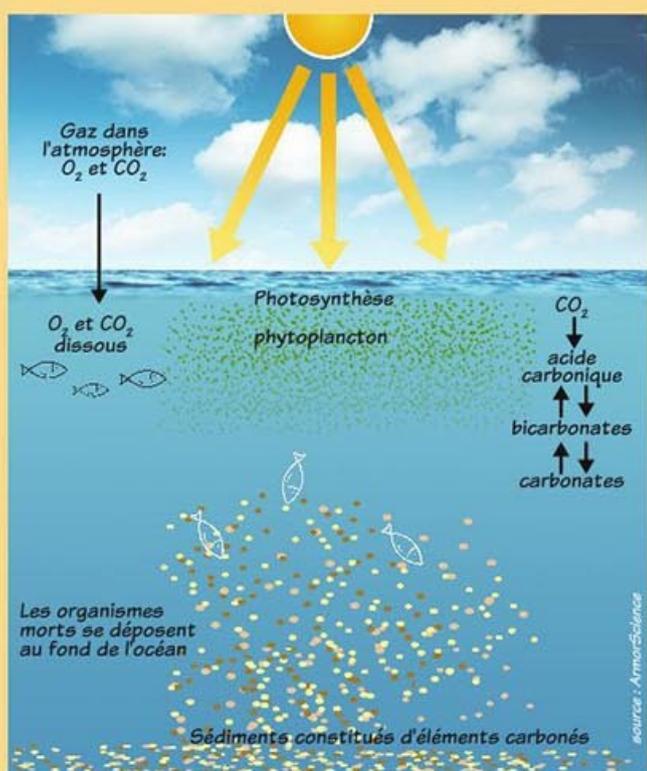


Fig 1: Le cycle du carbone

Energie solaire



3^e étape

Les poissons se nourrissent du plancton et participent à la chaîne alimentaire.

4^e étape

Les organismes morts tombent au fond de l'océan et produisent des sédiments contenant du carbone.

Aujourd'hui, plus d'un quart du CO_2 émis par l'homme est absorbé par l'océan, ainsi séquestré.



Analogie avec la croissance des arbres sur la terre.

Par photosynthèse, les arbres captent le CO_2 de l'atmosphère et rejettent de l'oxygène.
Le bois stocke du carbone.



UN PEU D'HISTORIQUE

de CORIOLIS à EKMAN

FORCE DE CORIOLIS

Deux ingénieurs du 19^e et 20^e siècle font progresser la connaissance du mode de circulation des vents et des courants marins.



Photo : Wikimedia commons

Fig 1 : G. de CORIOLIS (1792-1843)

Gaspard-Gustave de Coriolis, mathématicien et ingénieur français du 19^e siècle est surtout connu pour le théorème de mécanique qui porte son nom et pour la force de Coriolis qui correspond à une loi de la cinématique.



image: actuaologique

Fig 2: Ci-contre, une image satellite qui montre l'influence de la force de Coriolis sur un amas de nuages.

Conséquence du théorème de Coriolis:
« Toute particule en mouvement dans l'hémisphère nord est déviée vers sa droite (vers sa gauche dans l'hémisphère sud)

Ce théorème de physique est à la base de toute l'océanographie.

Fridtjof NANSEN, lors de l'expédition du Fram dans l'Océan Arctique (1893-1896), observe que la dérive de son navire suit celle des glaces qui se dirigent à 45° à droite de la direction du vent. (Fig 3)

Il s'attendait à ce que son bateau suive les vents !

Les observations de Nansen durant cette expédition ont contribué à faire progresser l'océanographie.

Au tout début du 20^e siècle, l'ingénieur Vagn-Walfrid EKMAN étudie les phénomènes océanographiques constatés par Coriolis et NANSEN.



Source: Wikipedia

Fig 3 : expédition de Nansen en 1893

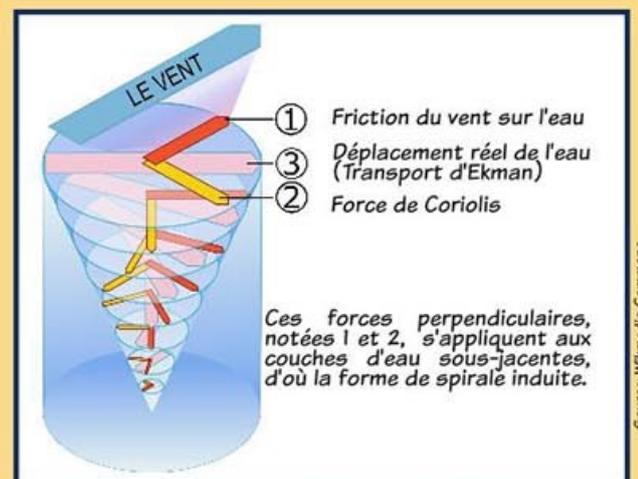
SPIRALE D'EKMAN

Ekman se rend compte que la surface de l'eau est soumise à 2 forces :

- la force liée à la friction du vent sur l'eau (1)
- la force de Coriolis perpendiculaire au vent (2)

Le déplacement réel de l'eau, noté 3 sur le dessin (en rose), suit la résultante des 2 forces en présence (1 et 2).

Les couches d'eau sous-jacentes adoptent le même comportement, d'où l'effet de spirale mis en évidence par Ekman.



Ces forces perpendiculaires, notées 1 et 2, s'appliquent aux couches d'eau sous-jacentes, d'où la forme de spirale induite.

Source: Wikimedia Commons

Fig 4 : Effet de la spirale d'Ekman



REMONTÉES D'EAU PROFONDE ou UPWELLINGS

Exemples

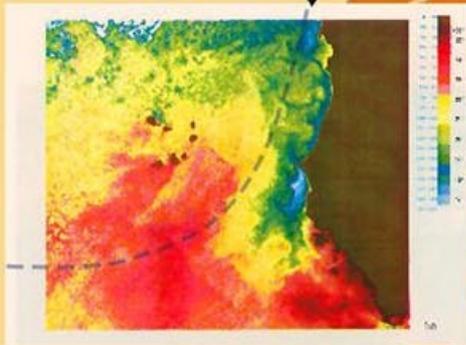
Pour illustrer ces phénomènes, prenons le cas de l'Afrique.

Au nord (côte du Sénégal), les vents dominants sont des alizés de Nord Est, pratiquement parallèles à la côte.

Au sud, (côte de Namibie) les vents dominants sont des alizés de Sud Est.

*Courant des
Canaries*

Fig 2 : En bleu et vert les remontées d'eau froide



La théorie d'Ekman rend compte de l'upwelling côtier (fig 1) L'upwelling équatorial Atlantique relève du pompage d'Ekman lié au régime local de vent; cependant, une remontée d'eau profonde a été aussi observée dans la partie 10-20°W, liée à des ondes d'instabilité.

Mécanisme de l'upwelling

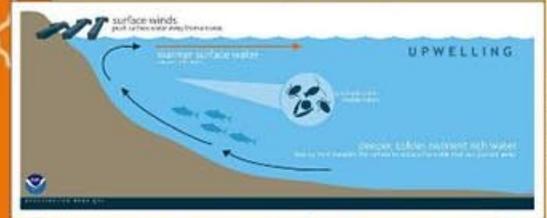


Fig 1 : Upwelling côtier

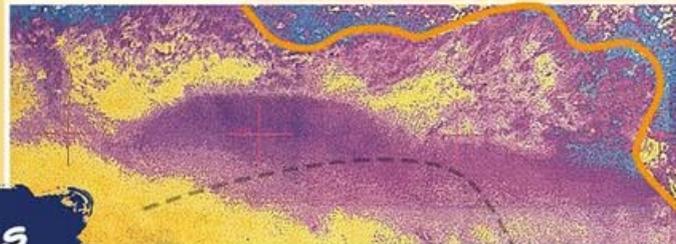


Fig 3 : Upwelling équatorial dans le golfe de Guinée

Observations

Fig 2, Sous l'effet des alizés, les eaux chaudes tropicales s'en vont au large, remplacées à la côte par des eaux froides.

Fig 3, Deux zones de remontée d'eau froide apparaissent: Au Cap Lopez (0°,8°E) l'upwelling est induit par le vent parallèle à la côte; SST < 20°C. Une autre zone est centrée entre 10°W et 10°E, l'image suggère la présence d'une onde tropicale (validée par une simulation numérique) apportant sa contribution aux remontées d'eaux froides.

Fig 4, Sur la côte de Namibie, le vent de Sud-Est entraîne le courant de Benguela qui s'éloigne de la côte, laissant place à des remontées d'eaux froides (14°C). Sur la côte orientale du Cap de Bonne Espérance, le courant des Aiguilles (chaud) fait route au Sud-Ouest, face au vent, et tourne un peu à gauche de sa route.

Conséquences

Les remontées d'eau froide sont accompagnées de sels nutritifs. Ces nutriments sont utiles à la photosynthèse, au développement du plancton et donc aux poissons et aux mammifères marins qui s'en nourrissent.

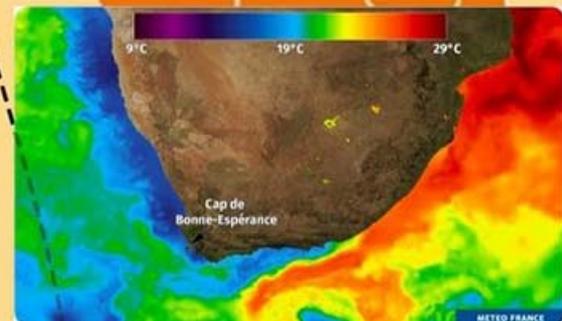


Fig 4 : En bleu les remontées d'eau froide du courant de Benguela (Côte de Namibie).



ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

Applications

Défense nationale :

Cartographier les conduits acoustiques (canaux SOFAR) qui guident les sons émis par les bateaux, les sous-marins et les animaux marins.

Recherche océanographique:

Connaissance des phénomènes de propagation des sons dans le milieu marin, étude des populations de mammifères marins etc.

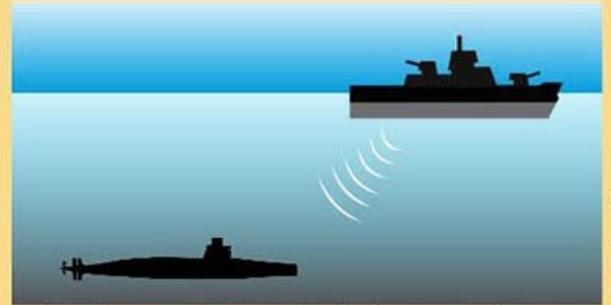


Fig 1 : Communications à très basses fréquences

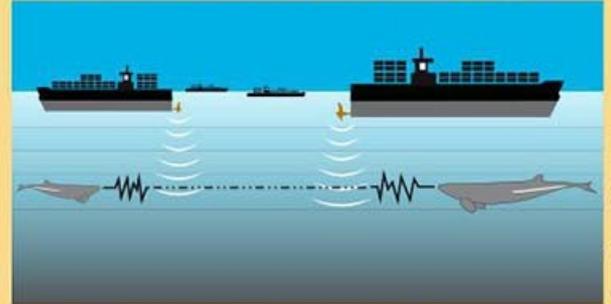


Fig 2 : Les sons émis par la navigation perturbent la communication des mammifères marins

Rappel de quelques notions :

Le paramètre qui gouverne la propagation est la vitesse des ondes :

Célérité **C** qui varie en fonction de la température **T**, de la salinité **S** et de la pression **P**. détermine des trajets multiples et des phénomènes de guide d'onde. L'eau est un milieu **dispersif**.

Rappel de quelques paramètres du milieu sous-marin :

Vitesse du son dans l'eau de mer **C** = 1500 m/s en moyenne. Les variations typiques de **C** sont entre 1490 m/s et 1530 m/s.

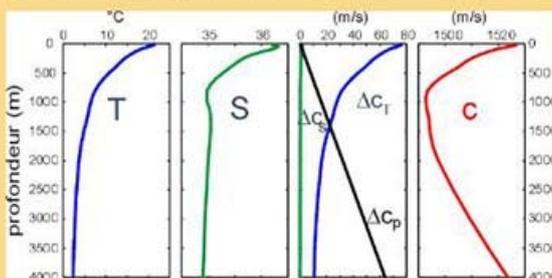
Les ondes sonores sont des ondes de pression longitudinales (Comme dans l'air) qui sont peu amorties en basse fréquence (10 Hz) et fortement amorties en hautes fréquences (1 MHz).

Les variations de direction dues aux variations de **C** sont appelées **réfractions**.

Température de l'eau comprise entre 25°C et 4 °C

Salinité entre 34 et 37 g/l

Effet des variations de **T** sur **C** : ΔC_T , de **S** sur **C** : ΔC_S , de **P** sur **C** : ΔC_P

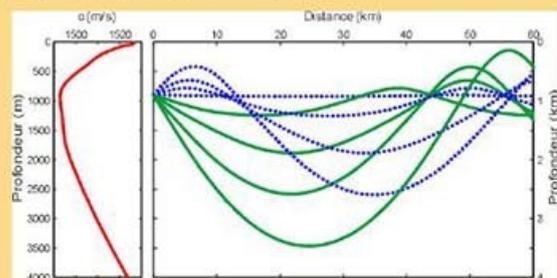


ΔC_T est proportionnel à **T** ;

ΔC_S est très faible ;

ΔC_P est proportionnel à **P** ;

C fonction de **T**, **S**, **P** décroît entre 0 et 1000 m et croît au-delà de 1000 m



Propagation de rayons acoustiques émis à partir d'une source à 900 m de profondeur.

En pointillés : rayon émis vers le haut (0 à 7°).

En traits pleins : rayons émis vers le bas (2 à 12°). A gauche le profil de vitesse du son correspondant.



LES RECHERCHES OCÉANOGRAPHIQUES

nous éclairent

L'océanographie, en tant que discipline scientifique, nous offre des outils essentiels pour comprendre les dynamiques complexes de l'océan.

Le climat

Régulateur principal du climat de la Terre, l'océan stocke et répartit une grande quantité de chaleur et absorbe une partie du dioxyde de carbone produit par l'activité humaine.

L'océan a donc un rôle crucial dans le contrôle des températures globales et dans l'atténuation des effets du changement climatique.

L'évaluation des disciplines de l'océanographie nous permet de comprendre le rôle essentiel de l'océan dans notre vie courante, même si l'on ne vit pas à proximité des côtes.

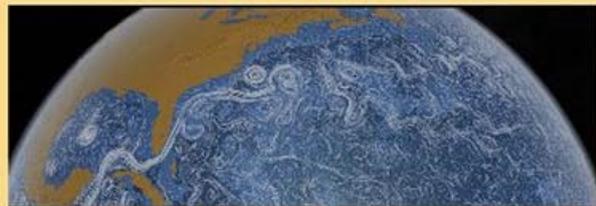


Fig 1 : Tourbillons à différentes échelles du courant du Gulf Stream le long des côtes EST des Etats-Unis.

Les étapes de la chaîne alimentaire

La chaîne alimentaire commence par la production de phytoplancton. Le plancton végétal est ensuite consommé par le zooplancton.

Les poissons filtreurs, à vie généralement courte, en profitent pour se développer en nombre.

Par exemple, la pêche de l'anchois du Pérou représente 10 millions de tonnes à comparer à la pêche globale mondiale qui stagne autour de 80 millions malgré les progrès technologiques des pêches.

A l'échelon supérieur on trouve les poissons carnivores et leurs prédateurs : mammifères marins, oiseaux de mer et l'Homme.



Fig 2 : diatomées (plancton végétal)

Fig 3 : larve de balanes (zooplancton)

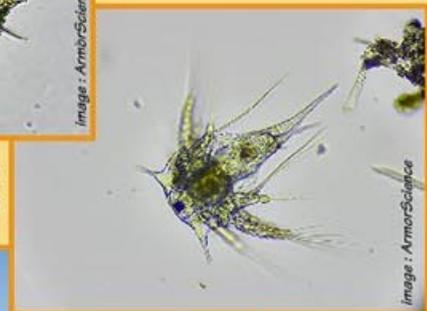


Fig 3 : pêche artisanale au Sénégal

Face aux défis actuels, l'étude approfondie des océans est plus cruciale que jamais. L'océanographie nous aide à concevoir des stratégies pour protéger la planète.

Connaître l'océan est donc une mission impérative pour le bien-être de la Terre et de l'humanité.

