

France



Dossier pédagogique

La machine océanique

ESERO is an education project of the European Space Agency (ESA) co-funded by ESA and by national partners active in the fields of education and space.

<https://esero.fr>

<https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/fr>

www.esa.int/Education



Copyright @ESERO France, CNES, ESA – 2020

La machine océanique

Ce dossier propose une investigation en classe pour découvrir *la machine océanique* : les mouvements des masses d'eau, la dynamique globale de ces mouvements en lien avec l'atmosphère et les relations avec le climat.

L'apport des satellites pour la connaissance de notre planète est mis en évidence.

Relations avec les programmes scolaires de cycle 4

Les notions abordées sont en relation avec les programmes de Cycle 4, notamment en :

- Sciences de la Vie et de la Terre : *Expliquer quelques phénomènes météorologiques et climatiques (dynamique des masses d'air et des masses d'eau; vents et courants océaniques. Les grandes zones climatiques de la Terre)*
- Physique/Chimie : *Organisation et transformations de la matière. Décrire la constitution et les états de la matière (transferts d'énergie, variation de la masse volumique avec la température)*
- en Géographie : *Mer et Océans (régulateurs climatiques)*

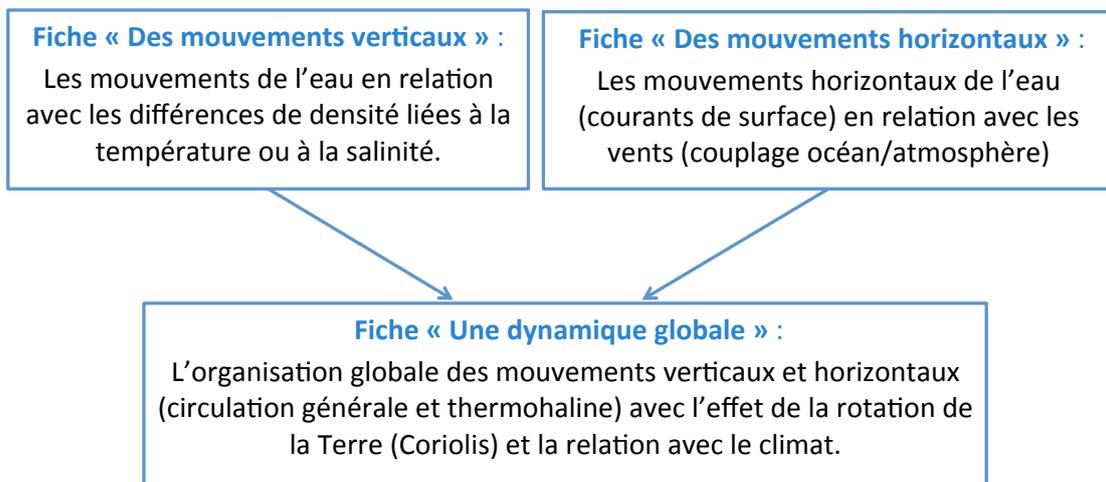
Démarche d'investigation

L'approche pédagogique proposée est une démarche d'investigation mettant les élèves en situation de recherche et permettant de travailler les compétences :

- Raisonner : Mener collectivement une investigation en sachant prendre en compte le point de vue d'autrui
- Pratiquer des démarches scientifiques, Utiliser des langages mathématiques, scientifiques et informatiques
- Concevoir, créer, réaliser, modéliser, représenter

Fiches pédagogiques

Ce dossier est composé de 3 fiches reliées :



Chaque fiche présente une démarche pédagogique avec une fiche élève photocopiable pour la trace écrite des élèves après l'investigation.

En conclusion du dossier, des prolongements ainsi qu'un « *En savoir plus* » sur les notions abordées sont proposés.

Fiche « Des mouvements horizontaux »

La découverte des mouvements horizontaux de l'océan en relation avec les vents est en lien notamment avec les programmes de SVT : *dynamique des masses d'air et des masses d'eau ; vents et courants océaniques*.

L'approche pédagogique mobilisera ici spécifiquement les compétences de : *mener une démarche scientifique d'investigation ; modéliser, concevoir, réaliser, représenter*.

⇒ **Introduction.** Le sujet sera abordé par un échange mobilisant les connaissances sur les océans : masses liquides ou glacées d'eau salée recouvrant 71% de la surface terrestre, les mouvements de l'eau en surface des océans (vagues, marées, courants, tsunamis...) et les causes possibles de ces mouvements : vents, attraction Lune/Terre/Soleil, mouvements de lithosphère (séismes). On s'intéressera ensuite particulièrement à l'action des vents.

⇒ **Investigation.** On demandera aux élèves de proposer des dispositifs permettant d'étudier l'action des vents sur les océans. Les différents dispositifs seront discutés en tant que modélisation et mis en œuvre en fonction du matériel disponible en classe.

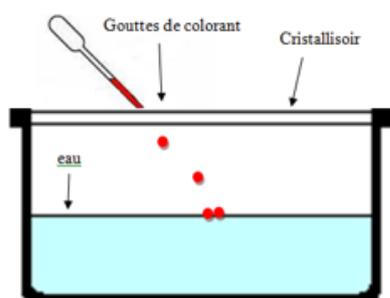
Exemple de dispositif :

Modélisation : L'eau représente l'océan, le cristalliseur représente le bassin océanique, le courant d'air produit par le sèche cheveux représente le vent.

Expérimentation : NB : Ajouter des gouttes de colorant (ou bouts de papier) en surface pour visualiser le mouvement de l'eau.)

Expérience témoin :

On n'exerce aucune influence sur l'eau



Expérience test :

On allume un sèche-cheveux (ou on souffle).

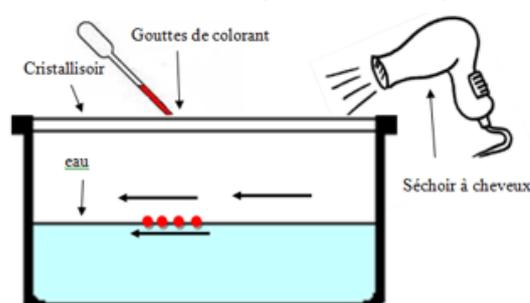


Image DR

L'expérimentation permet d'observer qu'un courant d'air entraîne un mouvement de l'eau en surface dans le sens de l'air puis qu'une circulation se met en place en suivant les bords du bac. Le courant d'air exerce une force de pression sur l'eau en surface qui entraîne son mouvement.

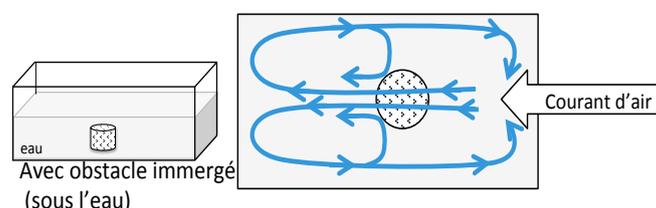
La modélisation sera enrichie par l'ajout d'obstacles à la circulation (pots et objets aux formes variées, émergés ou immergés) pour représenter des îles, des côtes irrégulières par exemple. Les courants de surface sont déviés et la circulation de l'eau se complexifie.

A l'échelle du globe, les courants marins sont modifiés par la présence d'îles, la forme des côtes,...

La fiche élève ci-après permet un réinvestissement du travail réalisé pendant cette expérimentation et propose de réfléchir aux limites de la modélisation.

⇒ **Réflexion.** L'observation des cartes satellites montre qu'à l'échelle réelle, les relations entre vents et courants ne sont pas simples. Les nombreux paramètres qui agissent (étendue réelle des océans, inertie, taille et forme des bassins océaniques (ouverts ou fermés, profonds ou pas,...), rotation de la terre,...) sont difficilement intégrables dans les modélisations !

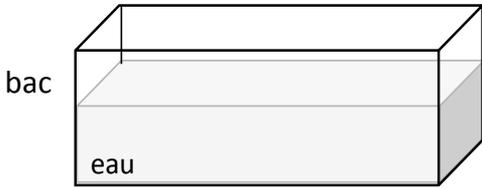
Les caractéristiques de la circulation des courants de surface à l'échelle du globe seront abordées avec la fiche 3.



Un dispositif expérimental est mis en place pour étudier l'action du vent sur les océans.

→a) Sur les vues « de dessus », indiquez par des flèches le mouvement de l'eau observé pour les 3 expériences :

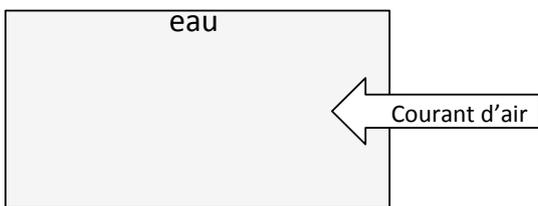
Dispositif expérimental :



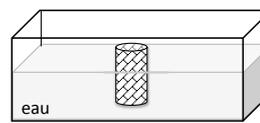
Expérience 1:



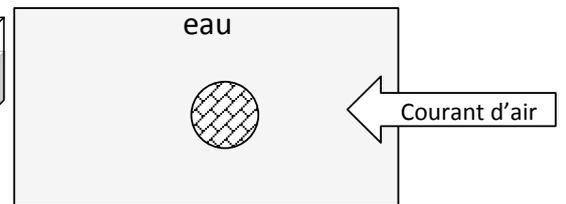
Expérience 2:



Expérience 3:



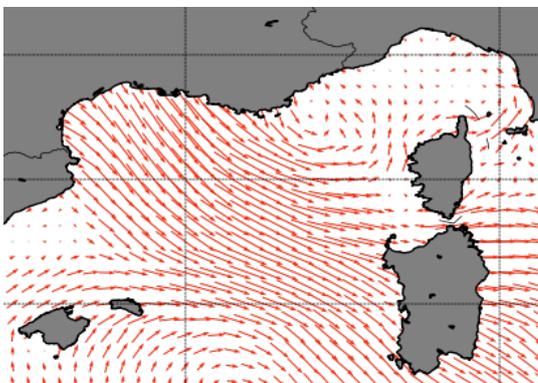
Avec un objet au milieu



→b) Comparez et analysez les résultats obtenus aux expériences 1 et 2.

→c) En considérant que ce dispositif est une modélisation, qu'indiquent les résultats des expériences 1, 2 et 3 sur l'action des vents à la surface des océans.

→d) Les satellites permettent une observation réelle de notre planète. En quoi ces cartes satellites ci-dessous révèlent les limites de la modélisation ?

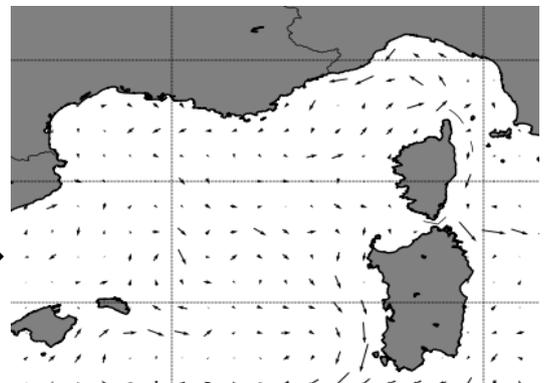


← Carte satellite des vents du 1/09/2020

— 12 m/s

→ Carte satellite des courants marins de surface du 1/09/20

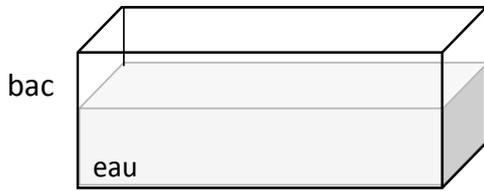
→ 0.2 m/s



Un dispositif expérimental est mis en place pour étudier l'action des courants d'air sur l'eau.

→ a) Sur les vues « de dessus », indiquez par des flèches le mouvement de l'eau observé pour les 3 expériences :

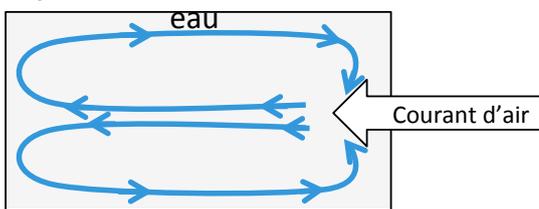
Dispositif expérimental :



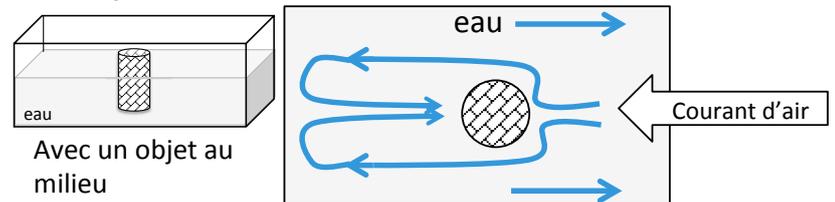
Expérience 1:



Expérience 2:



Expérience 3:



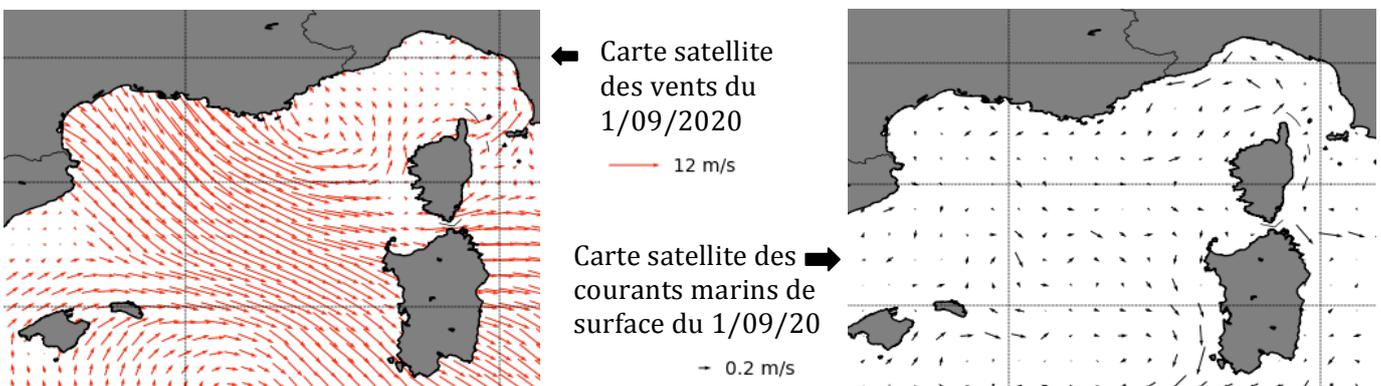
→ b) Comparez les résultats obtenus aux expériences 1 et 2.

- *Sans courant d'air (Exp. 1 témoin) l'eau ne bouge pas alors qu'avec un courant d'air (Exp. 2), l'eau est entraînée en surface dans le sens de l'air jusqu'au bord du bac puis se déplace « en boucle ».*

→ c) En considérant que ce dispositif est une modélisation, qu'indiquent les résultats des expériences 1, 2 et 3 sur l'action des vents à la surface des océans?

- *La force de pression des vents (souffle d'air) entraîne la formation de courants marins (eau) en surface. Ces courants marins vont dans le sens du vent jusqu'aux continents (bord du bac) puis s'organisent selon une circulation en boucle. La présence d'îles (objet) dévie et complique la circulation de l'eau.*

→ d) Les satellites permettent une observation réelle de notre planète. En quoi ces cartes satellites ci-dessous révèlent les limites de la modélisation ?



On observe qu'ici, les courants ne « suivent » pas les vents. Localement, la circulation de l'eau peut être compliquée par la présence d'îles, de bordures continentales, de variations des vents... La modélisation correspond plus à de vastes zones océaniques aux vents constants..

Fiche

« Des mouvements verticaux »

L'étude des mouvements verticaux de l'océan en relation avec les différences de densité des eaux est en lien notamment avec les programmes de SVT : *dynamique des masses d'eau; courants océaniques* et de Physique Chimie : *variation de la masse volumique avec la température*. Comme pour l'étude des courants horizontaux de surface, l'approche pédagogique mobilisera les compétences de : *Savoir mener une démarche scientifique d'investigation, concevoir, créer, réaliser, modéliser, représenter (schématiser)*.

⇒ **Introduction et problématisation.** On approfondira la connaissance des océans sur les caractéristiques au niveau de leur profondeur : 200 m au niveau des plateaux continentaux, 3800 m en moyenne et jusqu'à 11 000 m, record de profondeur enregistré à la fosse des Mariannes... L'enseignant indiquera qu'en plus des mouvements observés en surface, des études scientifiques ont mis en évidence de mouvements d'eau verticaux au niveau des pôles (dans la mer de Norvège au nord et autour de l'Antarctique) : d'importantes masses d'eau « plongent » de la surface vers la profondeur des océans.

→ Comment expliquer cette « plongée » d'eau au niveau des pôles ?

⇒ **Investigation 1.** Les élèves proposeront des hypothèses en relation avec les caractéristiques des zones polaires, glaciales. Les hypothèses sur une action du vent ou de la plongée de glaces seront écartées (*les vents entraînent des courants de surface n'excédant pas 300 m de profondeur ; les glaces flottent*) et on conservera celles concernant l'action de la température froide.

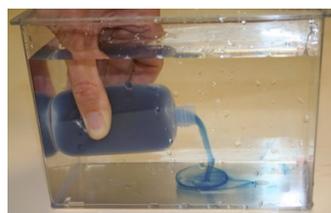
On demandera aux élèves de concevoir des expériences pour tester les hypothèses formulées. On discutera leur pertinence avant de les mettre en œuvre à l'aide du matériel à disposition.

Exemple d'expérience : Matériel : récipients, flacons, eau froide, eau à température ambiante, eau chaude et colorants pour visualiser les mouvements des eaux (par convention, colorant rouge pour eau chaude, bleu pour eau froide, eau à T° ambiante non colorée).

-Eau chaude
(en rouge)
libérée dans
de l'eau à T°
ambiante



-Eau froide
(en bleu)
libérée dans
de l'eau à T°
ambiante



-Eau chaude
dans eau froide
ou encore
-Eau froide
dans eau
chaude.

Images DR

La température de l'eau entraîne en effet des mouvements verticaux : l'eau froide « coule » (mouvement descendant), alors que l'eau chaude « s'élève » (mouvement ascendant). On pourra préciser ici la notion de masse volumique. Plus la différence de température entre les eaux est importante, plus les mouvements sont rapides.

En fin d'investigation, on pourra conclure que la plongée des eaux observée au niveau des pôles s'explique par le refroidissement des eaux de surface qui les rend plus denses.

Les étapes de la démarche d'investigation (hypothèse, expériences, résultats, analyse, ...) seront notées sur la fiche élève ci-après qui permettra également d'enchaîner sur la suite.

⇒ **Investigation 2.** La documentation et l'expérience (que l'on pourra également réaliser) permettent de réinvestir le raisonnement analytique précédent et de découvrir l'influence de la salinité sur la densité de l'eau.

⇒ **Bilan.** En synthèse des deux investigations, on conclura sur les mouvements verticaux des masses d'eau liés à leurs densités. En exemple, le schéma bilan pour les eaux polaires est légendé. Les mouvements verticaux des masses océaniques, comme la plongée des eaux polaires, font partie d'une circulation globale à l'échelle des océans qui sera abordée avec la fiche 3.

Des études scientifiques ont montré l'existence de mouvements d'eau verticaux au niveau des pôles : d'importantes masses d'eau « plongent » de la surface vers la profondeur des océans.

On mène une investigation pour comprendre l'origine de cette plongée :

→ Hypothèse :

→ Expérimentation : (schéma légendé)

→ Résultats :

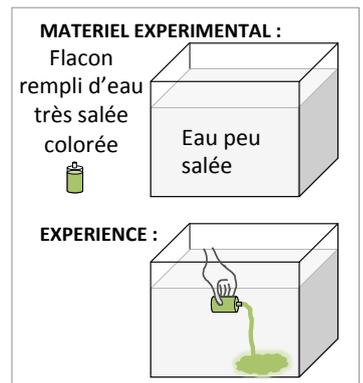
→ Analyse et interprétation :

→ Conclusion :

Pendant l'hiver polaire, l'eau de mer en surface gèle (passage de l'état liquide à l'état solide) et forme la banquise. Lors de la congélation de l'eau, le sel est éjecté de la glace et se retrouve dans l'eau de mer liquide. Afin de savoir si cette augmentation de la salinité de l'eau a un effet sur la plongée des eaux froides vers les fonds océaniques, on réalise l'expérience ci-contre.

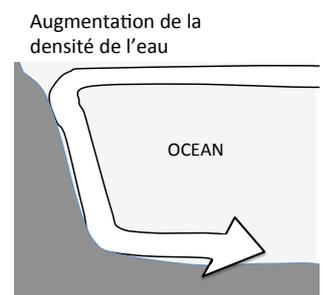
Analysez et interprétez le résultat obtenu :

Concluez.



BILAN GENERAL SUR LES MOUVEMENTS VERTICAUX :

.....
.....
.....



Plongée des eaux polaires (En coupe) :

: Eaux froides et salées

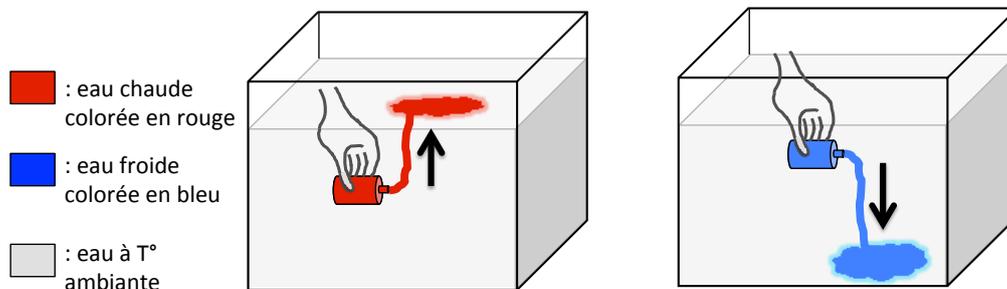
Des études scientifiques ont montré l'existence de mouvements d'eau verticaux au niveau des pôles : d'importantes masses d'eau « plongent » de la surface vers la profondeur des océans.

On mène une investigation pour comprendre l'origine de cette plongée :

→ Hypothèse : *La plongée des eaux serait liée à la température. En fonction de leur température les eaux coulent (plongent) ?*

→ Expérimentation : (schéma légendé) **Mélange d'eaux à différentes températures**

Exemple de schéma avec légende des couleurs, flèches des mouvements



→ Résultats : *L'eau froide se déplace vers le bas (mouvement descendant). Plus la différence de température est importante, plus les mouvements sont rapides.*

→ Analyse et interprétation : *La température de l'eau entraîne donc des mouvements verticaux : l'eau froide coule, alors que l'eau chaude s'élève. L'eau froide est plus dense (masse volumique plus importante) que l'eau chaude.*

→ Conclusion :

La plongée des eaux en profondeur observée au niveau des pôles s'explique par le refroidissement de l'eau : les eaux froides, denses, s'enfoncent dans les eaux moins froides.

Pendant l'hiver polaire, l'eau de mer en surface gèle (passage de l'état liquide à l'état solide) et forme la banquise. Lors de la congélation de l'eau, le sel est éjecté de la glace et se retrouve dans l'eau de mer liquide. Afin de savoir si cette augmentation de la salinité de l'eau a un effet sur la plongée des eaux froides vers les fonds océaniques, on réalise l'expérience ci-contre.

Analysez et interprétez le résultat obtenu :

- *L'eau salée a un mouvement vers le bas : elle est plus dense que l'eau moins salée.* -----

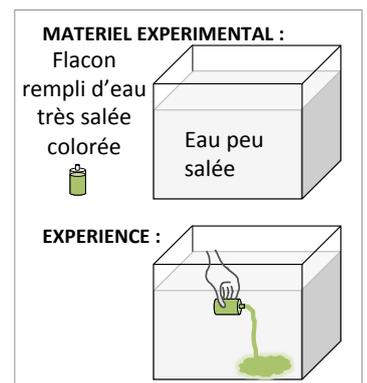
Concluez.

- - *L'augmentation de la salinité des eaux froides polaires lors de la formation de la banquise accroît leur densité et contribue à leur plongée vers les fonds océaniques.*

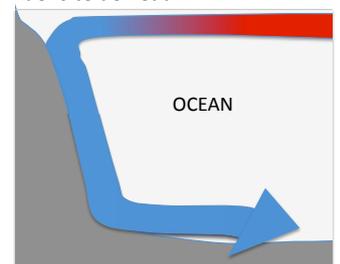
BILAN GENERAL SUR LES MOUVEMENTS VERTICAUX :

- - *Les variations de température et de salinité modifient la densité de l'eau et entraînent des mouvements verticaux des masses d'eau. Aux pôles, les eaux froides et très salées, denses, plongent en profondeur.*

Plongée des eaux polaires (En coupe) :



Augmentation de la densité de l'eau



■ : Eaux froides et salées

Fiche « Une dynamique globale »

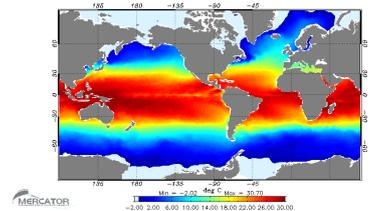
Les mouvements verticaux et horizontaux des masses océaniques s'organisent à l'échelle du globe suivant une circulation en relation avec l'effet de la rotation de la Terre (Coriolis). Cette dynamique joue un rôle important sur le climat.

Ces notions sont en lien notamment avec les programmes de SVT : *Explorer et expliquer certains éléments de météorologie et de climatologie, dynamique des masses d'eau; courants océaniques, les grandes zones climatiques de la Terre* et de Physique Chimie : *transferts d'énergie, variation de la masse volumique avec la température.*

L'approche pédagogique mobilisera les compétences de : *Lire, interpréter, exploiter et mettre en relation des données présentées sous différentes formes. Savoir mener une démarche scientifique d'investigation.*

⇒ **Introduction et problématisation :** La carte satellite des températures (en annexe en fin de dossier) montre qu'il existe un déséquilibre thermique important à la surface de l'océan avec une température très élevée à l'équateur, qui diminue en allant vers les pôles.

Quels liens peut-il exister entre ce déséquilibre thermique et les océans ? Les élèves formuleront l'hypothèse que les différences de températures entraînent l'existence de courants océaniques.



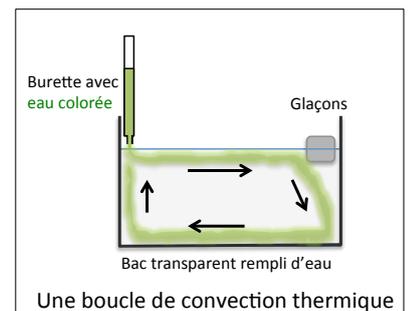
Carte satellite des températures : un déséquilibre thermique planétaire.

⇒ **Investigation 1** L'expérience permet aux élèves d'observer que la plongée d'eau refroidie par la glace entraîne une circulation en boucle, de mouvements verticaux mais également horizontaux, et d'expliquer cette convection à partir de leurs acquis (Cf. fiche 2)

La convection ralentit et s'arrête lorsque la température est partout la même (t° d'équilibre).

Expérience de modélisation

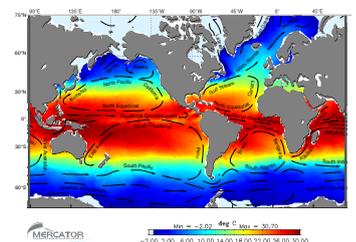
Par analogie, l'existence de zones froides polaires entraînant la plongée d'eaux denses, conduit à faire l'hypothèse d'une circulation convective dans les océans. Cette investigation se poursuit à partir de la fiche élève ci-après.



⇒ **Investigation 2 :** La description de la circulation océanique (*schéma 1 : Le courant Arctique plonge, parcourt le fond des océans, se scinde en 2, une partie remonte dans l'océan Indien, l'autre dans le Pacifique puis se réunissent avant de repartir vers les pôles*) montre les limites de la modélisation expérimentale. Avec le schéma 2, on commence à établir un lien au niveau thermique : les courants emmagasinent la chaleur dans les zones chaudes et en libèrent aux pôles.

En relation avec la force de Coriolis, la rotation des grands gyres océaniques en surface permet le transport de l'énergie vers les pôles et la libération de cette énergie par les échanges continus de chaleur avec l'atmosphère. Pour permettre de visualiser cette relation, on pourra montrer ces courants superposés à la carte satellites des températures de surface.

On pourra ajouter des flèches symbolisant ces échanges sur le schéma 2.



Carte satellite des températures et grands courants océaniques.

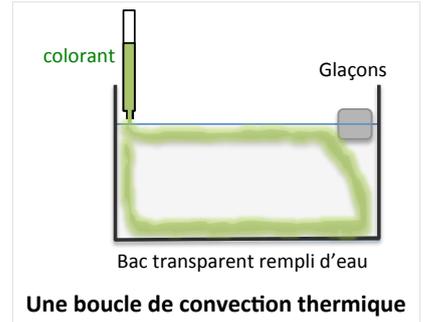
⇒ **Bilan :** Les courants de surface et la circulation thermohaline permettent le transport, la redistribution et la régulation de la chaleur terrestre inégalement répartie. L'océan joue ainsi un rôle déterminant pour le climat mondial en atténuant les différences de température entre équateur et pôles.

Le réchauffement climatique, influant sur la température des océans, la fonte des glaces et la banquise pourrait perturber ce rôle régulateur.

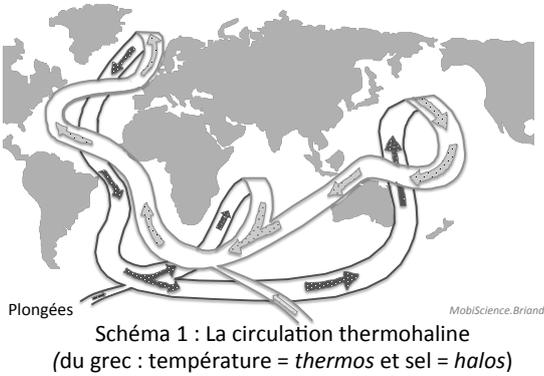
Les cartes satellites des températures montrent que la température en surface des océans est très élevée à l'équateur et diminue en allant vers les pôles.

Pour modéliser la circulation océanique liée à ces variations de température, on réalise une expérience de modélisation.

- indiquez sur le schéma les mouvements de l'eau obtenus.
- expliquez l'origine de cette circulation et les mouvements.



Quels points communs et quelles différences présente la circulation océanique (Schéma 1 ci-dessous) avec l'expérience de modélisation ?



Sur la coupe océanique (Schéma 2 ci-dessous),

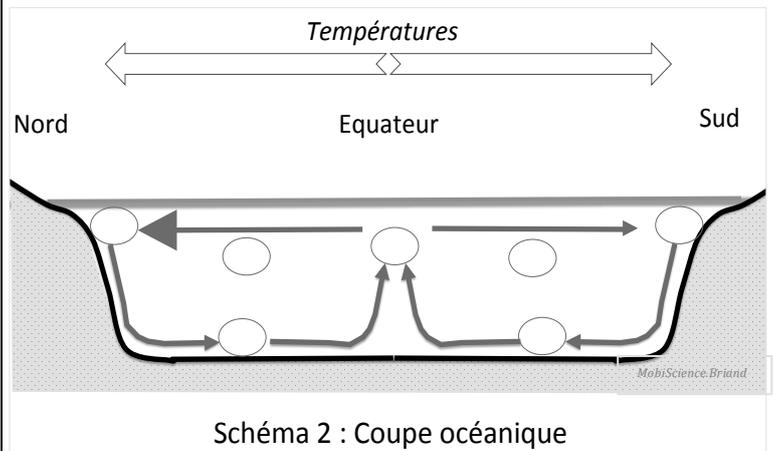
- numérotez dans les ronds les mouvements océaniques en fonction de leur direction:

- 1 : plongée
- 2 : courant horizontal en profondeur
- 3 : remontée
- 4 : courant horizontal en surface

- coloriez avec du rouge (T° chaudes) et du bleu (T° froides) les flèches nommées *Températures*.

Dans quelles zones l'océan :

- emmagasine t'il le plus d'énergie (se réchauffe)? _ _ _
- rejette t'il le plus de chaleur (se refroidit)? _ _ _ _ _



Les échanges thermiques entre la surface de l'océan et l'atmosphère sont continus. Quel effet ont les courants océaniques de surface sur le transport de chaleur ?

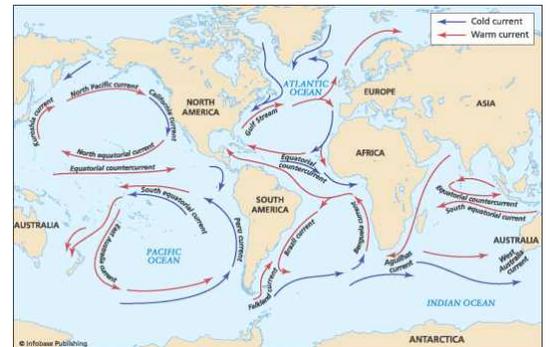


Schéma 3 : Grands courants océaniques de surface

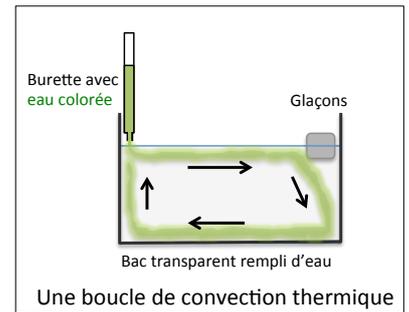
BILAN :

Les cartes satellites des températures montrent que la température en surface des océans est très élevée à l'équateur et diminue en allant vers les pôles.

Pour modéliser la circulation océanique liée à ces variations de température, on réalise une expérience de modélisation.

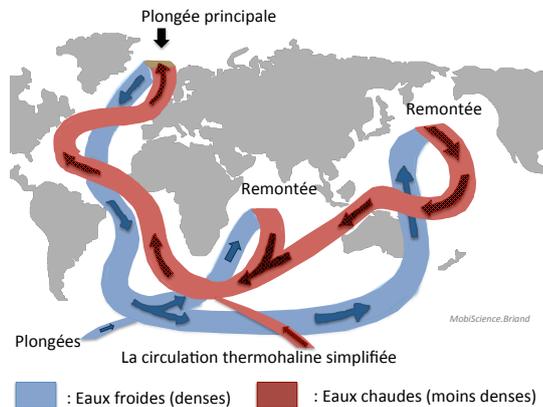
- indiquez sur le schéma les mouvements de l'eau obtenus.
- expliquez l'origine de cette circulation et les mouvements.

L'eau refroidie par le glaçon est dense, elle se déplace vers le bas (plongée). L'eau en surface vient « compenser » ce départ et l'eau du fond déjà présente est « poussée » : une circulation de « convection » se met en place.



Par analogie, on observe également une circulation en boucle de convection dans les océans.

Quels points communs et quelles différences présente la circulation océanique (Schéma 1 ci-dessous) avec l'expérience de modélisation ?



La circulation océanique s'organise aussi par convection thermique. Par contre, plusieurs boucles de forment, en lien avec des bassins océaniques qui communiquent tous entre eux. Les eaux océaniques plongent aussi en lien avec leur salinité : c'est une convection thermohaline.

Sur la coupe océanique (Schéma 2 ci-dessous),

- numérotez dans les ronds les mouvements océaniques en fonction de leur direction:

- 1 : plongée
- 2 : courant horizontal en profondeur
- 3 : remontée
- 4 : courant horizontal en surface

- coloriez avec du rouge (T° chaudes) et du bleu (T° froides) les flèches nommées *Températures*.

Dans quelles zones l'océan :

- emmagasine t'il le plus d'énergie (se réchauffe)? **Equateur**
- rejette t'il le plus de chaleur (se refroidit)? **Pôles Nord/sud**

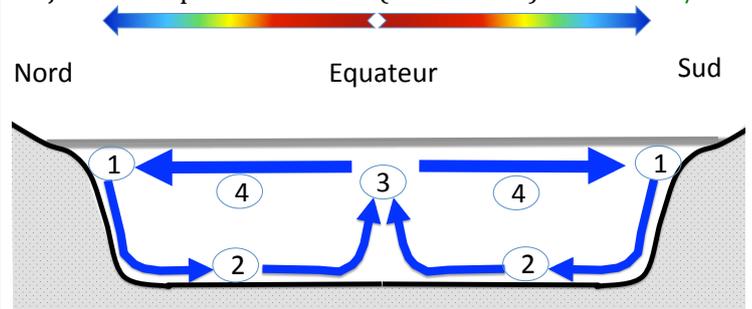
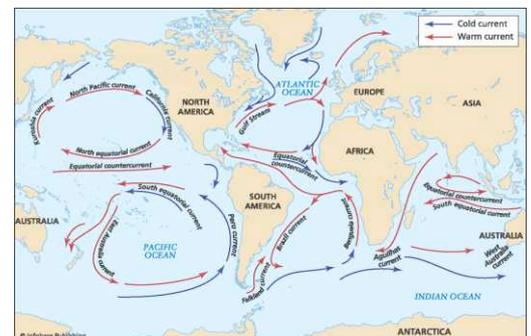


Schéma 1 : Coupe océanique schématique

Les échanges thermiques entre la surface de l'océan et l'atmosphère sont continus. Quel effet ont les courants océaniques de surface sur le transport de chaleur ?

Ces grands gyres, tournant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud (force de Coriolis) favorisent le transport de l'énergie de l'équateur vers les pôles et des échanges thermiques océan-atmosphère.

Schéma 3 : Grands courants océaniques de surface



BILAN

Les courants océaniques de surface et thermohalins créent une dynamique globale dans l'océan. Cette circulation globale permet de réguler le déséquilibre thermique de la Terre en atténuant les différences de température entre équateur et pôles. L'océan joue ainsi un rôle déterminant pour le climat mondial.

Prolongements

L'étude de « la machine océanique » réalisée met en place des notions très impliquées dans le climat comme la densité, le transfert de chaleur, la convection... et met en évidence les limites (rapidement atteintes) des modélisations. Pour étudier la machine océanique, les observations de notre planète issues des satellites sont primordiales. En effet, ces instruments spatiaux sont indispensables pour étudier notre planète, sa dynamique et son évolution.

On pourra approfondir en mettant en évidence les différences entre les mouvements thermohalins, qui concernent 90% de la masse des océans et qui sont très lents (une boucle de circulation met environ 1siècle) et les mouvements de surface qui ne concernent que la superficie des océans et 10 % de leur masse mais sont directement impliqués dans les transferts continus de chaleur à l'atmosphère.

On pourra également étudier comment les vents, et plus globalement l'atmosphère, interviennent dans ces mécanismes permettant les transferts de chaleur à l'interface Océan/atmosphère et donc également dans la régulation climatique.

La partie « *En savoir plus* » ci-après plus fournit quelques éléments permettant d'approfondir les notions traitées dans ce dossier.

Enfin, on pourra se pencher sur l'origine de l'énergie observée à la surface de notre planète qui, d'origine essentiellement externe (soleil) et inégalement distribuée, est responsable des zones climatiques contrastées selon les latitudes.

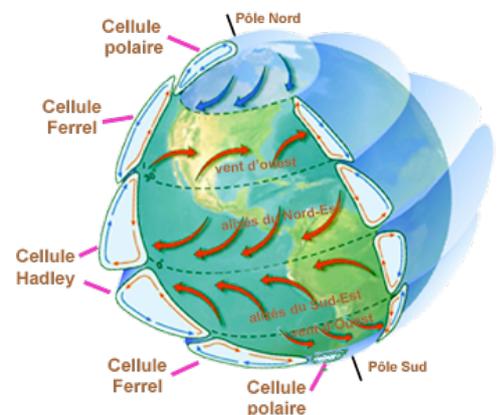
L'évolution du climat, au cours des temps géologiques passés ou actuelle en relation avec l'action humaine, et ses conséquences sur la biodiversité sera aussi un prolongement évident.

En savoir plus

→ **Mouvements atmosphériques**

La circulation des masses d'air, liée à l'inégale répartition du chauffage de la surface terrestre par le Soleil, entraîne, par convection, la formation de vents dominants horizontaux en surface (Alisés et vents d'Ouest). Les vents sont mécaniquement décrits par les lois de la dynamique des fluides (comme les courants marins) et leur circulation est très sensible à la rotation terrestre.

Circulation atmosphérique globale . Image DR



Jusqu'à une certaine profondeur, les vents ont une influence sur les courants : grâce aux forces de frottement, ils mettent en mouvement les masses d'eau directement en contact avec l'air en surface. Les vagues qui se créent entraînent le mouvement des masses d'eau immédiatement au-dessous. Cette influence diminue rapidement avec la profondeur, et les courants marins de surface n'atteignent pas plus de 300m de profondeur.

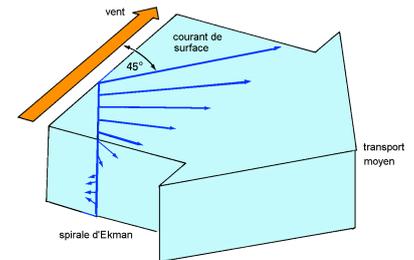
Localement, les vents peuvent être variables et sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse (ex. : échelle de Beaufort), leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets.

La circulation atmosphérique est ainsi impliquée dans les phénomènes météorologiques locaux et dans le climat global de notre planète.

→ **Circulation océanique en surface**

Les courants horizontaux concernent la surface des océans (jusqu'à 300 m de profondeur) et ne représentent qu'environ 10 % de l'eau des océans.

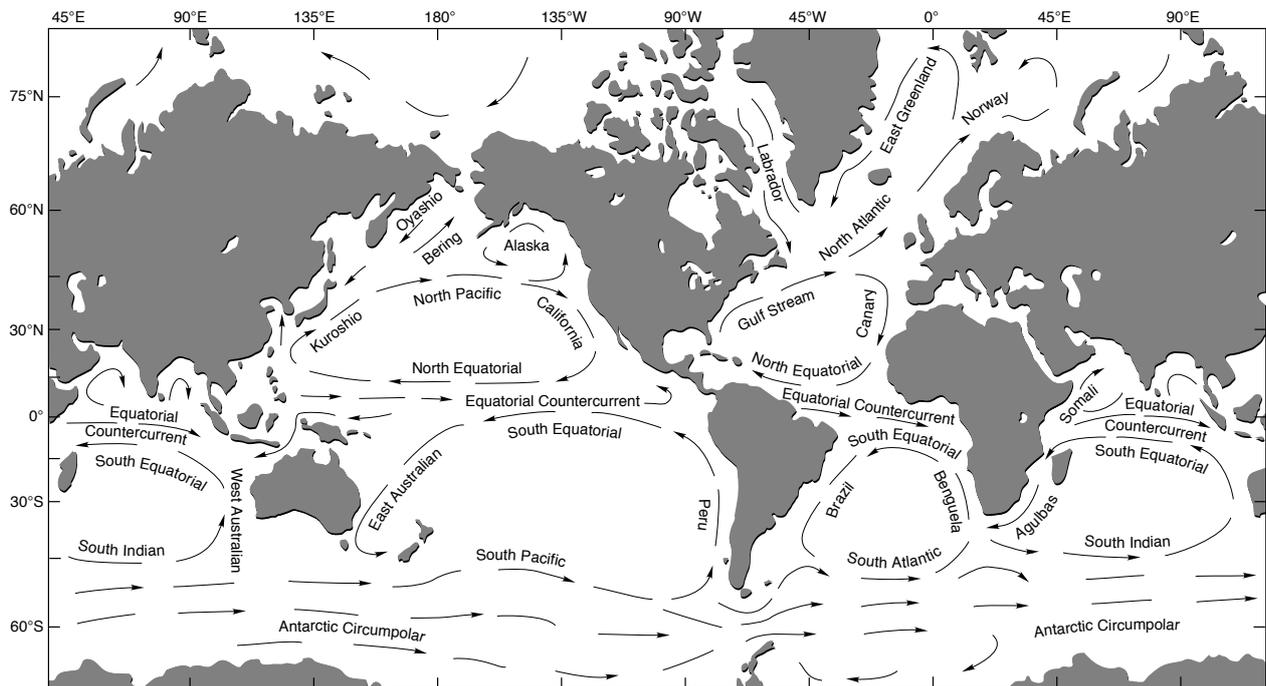
Entraînés par les vents mais très sensibles à la rotation de la Terre sur elle-même, les directions des courants principaux sont modifiées par rapport à la direction du vent en fonction de la profondeur, en suivant les transports d'Ekman.



Transports d'Ekman. Image DR

En surface, la force de Coriolis entraîne ainsi une déviation de la trajectoire des courants d'en moyenne 45° par rapport à la direction du vent.

Sous cet effet de la rotation de la Terre, les grands courants s'enroulent en formant de gigantesques gyres qui se dirigent vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud dans chacun des grands bassins océaniques.



Malone fig1
3/14/93

CLS

Courants de surface principaux

Cette circulation océanique de surface engendrée par les vents est de loin la plus dynamique et la plus énergétique. Elle est également impliquée dans la majeure partie des phénomènes météorologiques de petite échelle.

→ Formation de la banquise et salinité des eaux

En hiver, la banquise se forme lorsque la température de l'eau atteint $-1,8^{\circ}\text{C}$. De petites aiguilles de glace se forment en surface puis se soudent les unes aux autres. Le réseau cristallin de la glace n'incorporant pas le sel, des gouttelettes de saumure (eau saturée en sel) se forment au sein de la glace.

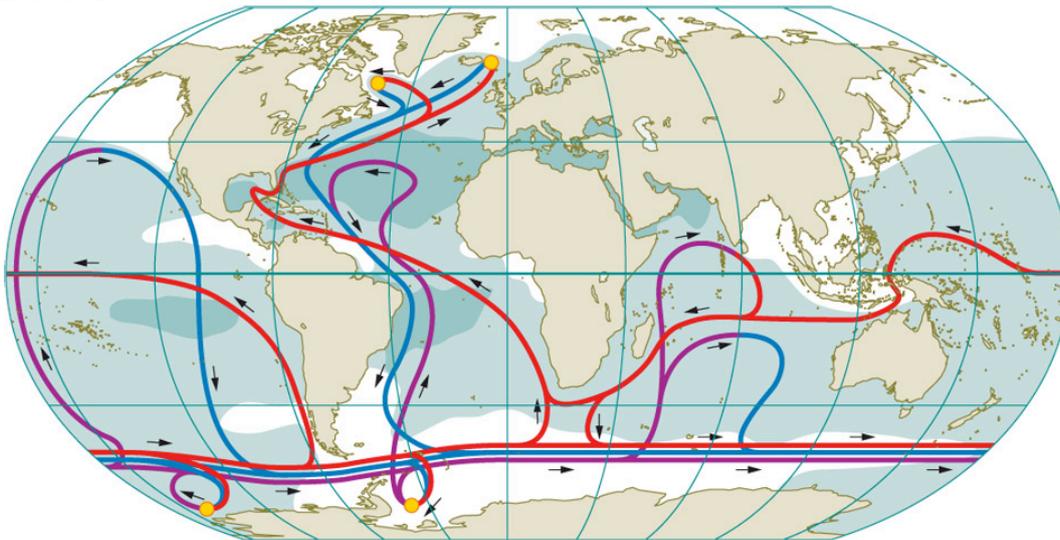
Progressivement, alors que la banquise s'épaissit, ces gouttelettes de saumure se regroupent et migrent par gravité vers le bas de la banquise avant de rejoindre, peu à peu, la mer. La banquise s'adoucit et n'est à la fin qu'eau douce alors que sous la banquise, la salinité de l'eau augmente, ce qui accentue la plongée convective de cette eau froide et déjà dense.

Une partie de la banquise ne disparaît pas alors de la fonte estivale (banquise pérenne). La partie qui fond lors de la fonte estivale et qui se reforme l'hiver suivant est moins épaisse (banquise annuelle, d'épaisseur entre 1 et 2m). Le réchauffement climatique a un impact sur la formation et la fonte banquise et donc sur la salinité et la densité des eaux polaires.

→ Circulation thermohaline

La circulation des courants profonds à l'échelle du globe présente en réalité plusieurs zones de plongée:

- principale zone de plongée convective dans le Nord de l'Atlantique Nord : mer de Norvège, mers du Groenland et du Labrador au large de l'Islande
- deuxième zone, minoritaire et moins étudiée, à proximité de l'Antarctique : mer de Weddell, mer de Ross.

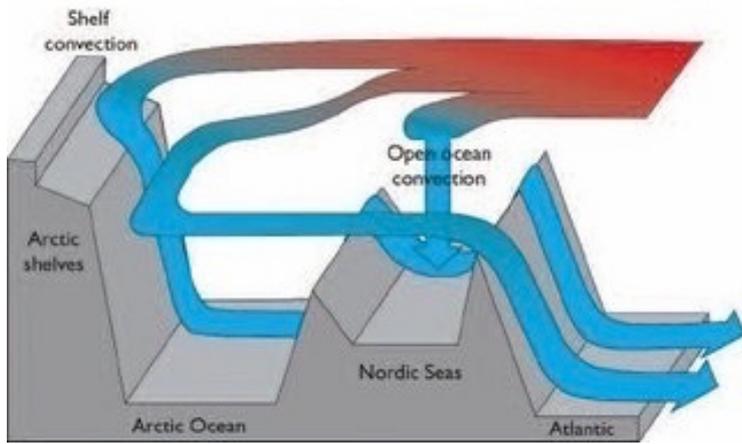


oceancurrent.energy- DR

La circulation thermohaline est initiée par la plongée de ces eaux froides et denses dans les régions polaires :

- la plongée des eaux vers la profondeur crée un « appel » de masses d'eau.
- cette plongée convective "aspire" ainsi des masses océaniques provenant des zones tropicales et équatoriales, par couplage avec les vents de surface.
- ces masses d'eau entraînées vers les hautes latitudes par les forts vents de surface et en « compensation » des masses ayant plongé sont à leur tour compensées par la remontée d'eaux profondes.

Cette circulation convective est très lente (un cycle complet prend, selon les estimations, entre 800 et 1000 ans, soit de l'ordre du millimètre par seconde) mais concerne 90 % de la masse océanique.



DR Des zones de plongées en Arctique

→ Le suivi des mouvements profonds

Les masses d'eau qui circulent dans l'océan mondial ont des températures et salinité qui évoluent très lentement, elles se mélangent très peu les unes aux autres. De ce fait, les océanographes peuvent étudier ces masses d'eaux grâce à aux traceurs qu'elles contiennent. Ces traceurs, naturels (ions silicate, phosphate, nitrate, dioxygène, etc.) ou provenant l'activité chimique humaine (fréon, tritium, carbone, etc.), permettent ainsi d'étudier les déplacements des masses d'eaux dans l'océan profond.

Quelques exemples :

- Suite aux essais nucléaires dans les années 1960, le tritium ^3H présent de manière infime à l'état naturel dans l'atmosphère a augmenté. Diffusé dans les eaux de surface lors des échanges entre l'atmosphère et l'océan puis entraîné par les courants plongeants, on le localise dix ans plus tard à 5000 mètres de profondeur. Ce marqueur permet ainsi de suivre les masses d'eaux initialement en surface en 1960.

- Le fréon, appelé également CFC (chlorofluorométhane), connu particulièrement pour son implication dans l'augmentation du trou dans la couche d'ozone, permet lui aussi de connaître avec grande précision le parcours de la circulation profonde globale de l'océan puisqu'il a été dispersé sur l'intégralité de la surface des eaux.

- Enfin, les isotopes comme le carbone 14 radioactif ou le chlore 36 permettent une datation des eaux basée sur la décroissance radioactive. Si le carbone 14 ne peut être utilisé pour des eaux dont le temps de résidence excède 35000 ans, le chlore 36, avec une demi-vie de 3,01.105ans, est un traceur intéressant pour l'estimation de l'âge des eaux des grands bassins. Le chlore 36 est un traceur historique, dont la forte concentration est liée à l'utilisation des bombes thermonucléaires dans les années 1963-1964.

→ Circulation océanique globale et conséquence sur le Climat

L'océan emmagasine de l'énergie solaire, principalement dans les régions équatoriales et tropicales et il restitue cette chaleur aux latitudes supérieures par des échanges continus en surface avec l'atmosphère :

En se dirigeant vers les pôles, les courants chauds se refroidissent en surface en cédant leur chaleur à l'atmosphère.

Au niveau des pôles, si une partie repart (en surface) vers l'équateur, une autre partie, la plus froide et dense, plonge et circule en profondeur.

A leur tour, ces courants froids se réchaufferont au contact de l'énergie solaire, et « aspirés » vers les hautes latitudes, céderont progressivement cette chaleur à l'atmosphère.

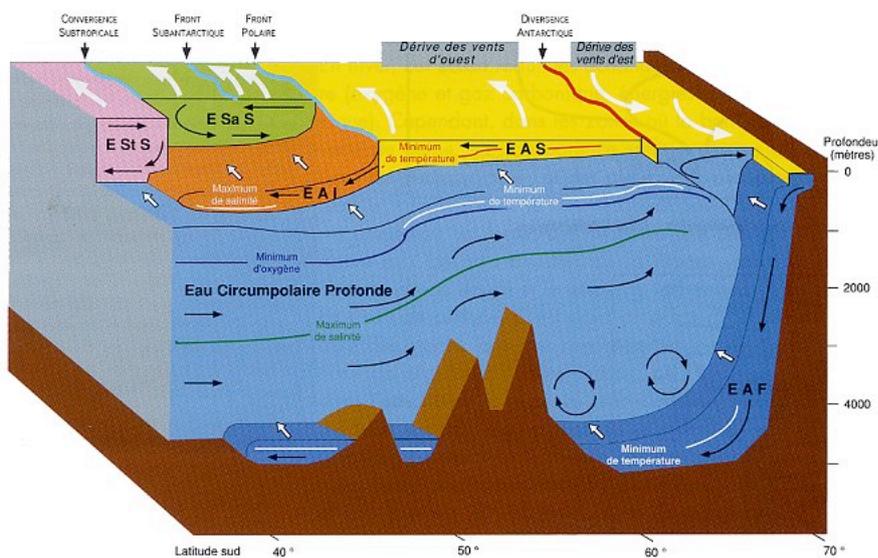
La circulation océanique globale permet ainsi une redistribution de l'excès de chaleur perçu au niveau des tropiques et de l'équateur vers les régions de hautes latitudes. En assurant les transferts de chaleur, elle a ainsi un effet modérateur sur le climat et ses changements.

Résultant des courants en surface et de la circulation thermohaline, les masses océaniques impliquées suivent une stratification d'eaux océaniques aux caractéristiques différentes en fonction de la profondeur.

Lorsque de telles masses se rencontrent, des zones de convergence ou de divergence d'eaux apparaissent, engendrant des phénomènes d'*upwelling* (remontées d'eaux profondes à la surface) ou de *downwelling* (plongée d'eaux de surface).

Ces mélanges favorisent les transferts d'énergie en surface par le couplage océan-atmosphère et contribuent à la régulation climatique.

Pour illustration, stratification et circulation des masses d'eau dans l'océan austral :



EAF : Eau antarctique de fond
 ESa S : Eau Subantarctique de surface
 EAS : Eau antarctique de surface
 ESt S : Eau Subtropicale de Surface
 EAI : Eau antarctique intermédiaire

(Document : G. Jacques, d'après Lutjeharms-1991 -Expédition EREBUS – 1993-DR)

Les échanges thermiques atmosphère/hydrosphère

Si l'atmosphère est la composante rapide de la machine climatique, la chaleur spécifique de l'eau de mer est beaucoup plus élevée que celle de l'air (les premiers 10 mètres d'eau peuvent emmagasiner autant de chaleur que toute l'épaisseur d'atmosphère). Les océans sont donc de formidables réservoirs de chaleur.

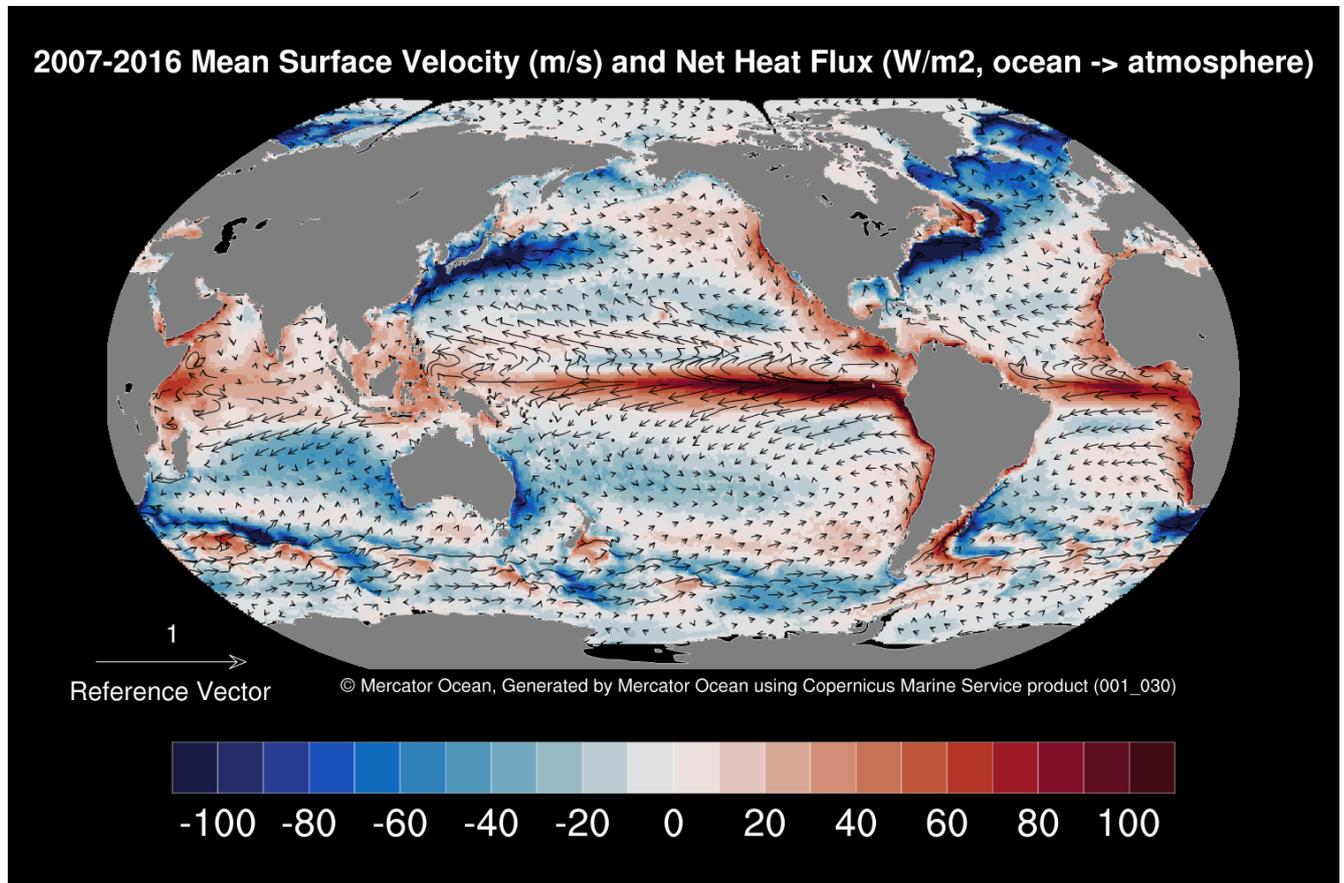
La quantité de chaleur emmagasinée dépend de la latitude (plus importante à l'équateur), des saisons (plus importante en été) et de la couverture nuageuse (plus importante par ciel dégagé) : en moyenne, près de l'équateur, ce flux de chaleur est de l'ordre de +200 à +250 W/m² (contre +40 W/m² aux hautes latitudes).

Les échanges d'énergie entre hydrosphère et atmosphère au cœur du système climatique se font de plusieurs manières :

- par rayonnement infrarouge (L'Océan réémet des infrarouges suite à la réception de l'énergie solaire)
- par conduction et convection (transmission directe de chaleur d'environ -10 w/m² en moyenne, mais peut parfois dépasser -50 w/m².)
- par évaporation (chaleur latente : l'évaporation de l'eau « prend de la chaleur » à l'océan et la libère dans l'atmosphère lors de la condensation de la vapeur d'eau.): -70 W/m² en moyenne. Ce flux est d'autant plus important que l'air est loin de la saturation et en cas de vent fort. Il est donc

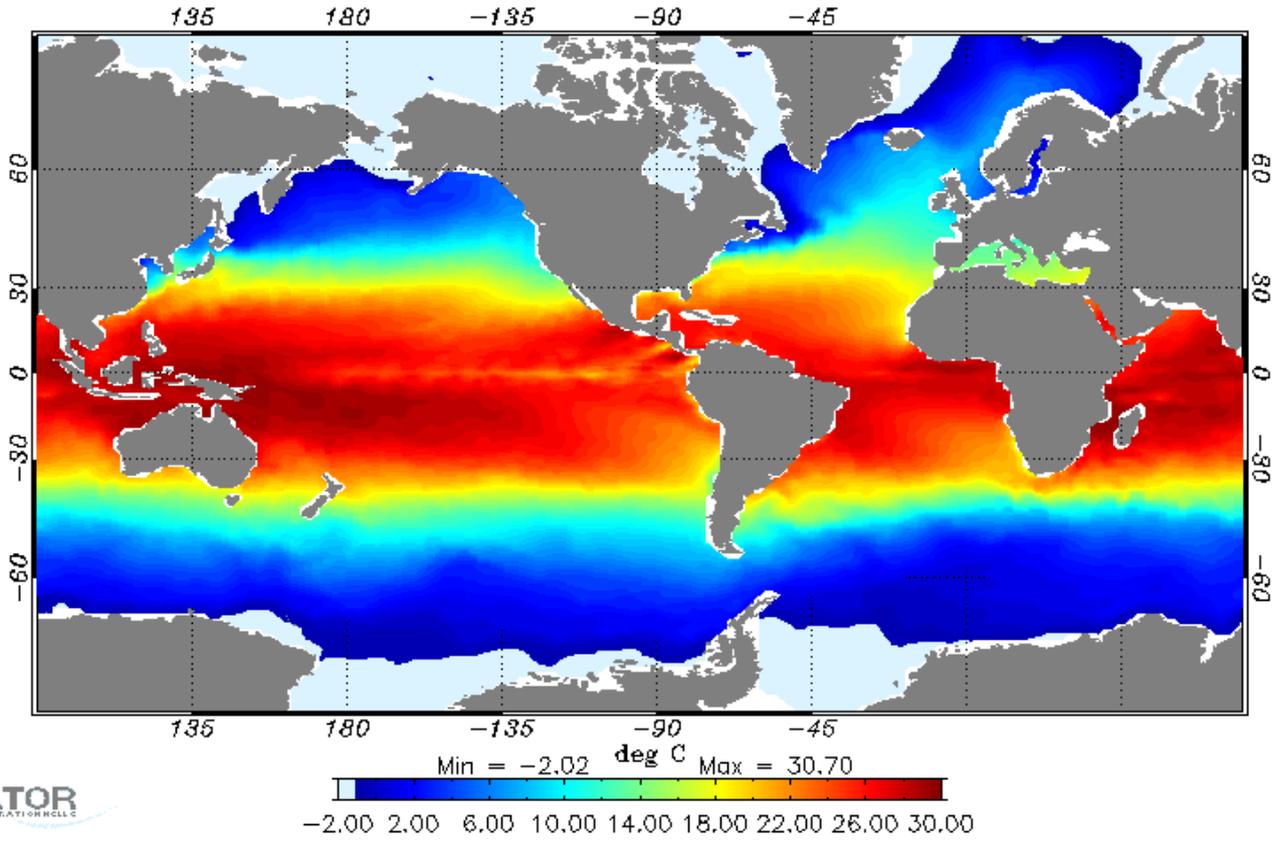
plus important dans les zones tropicales (-150 W/m^2) qu'aux hautes latitudes (-30 W/m^2), et peut grimper à -200 W/m^2 pour le Gulf Stream.

Le bilan des échanges entre l'océan et l'atmosphère schématisé ci-dessous est le résultat de l'addition du flux solaire et des flux infrarouge, latent et de conduction (négatifs). Ce bilan est positif dans les zones tropicales (stockage de chaleur dans l'océan) et négatif aux plus hautes latitudes (destockage de chaleur par l'océan).

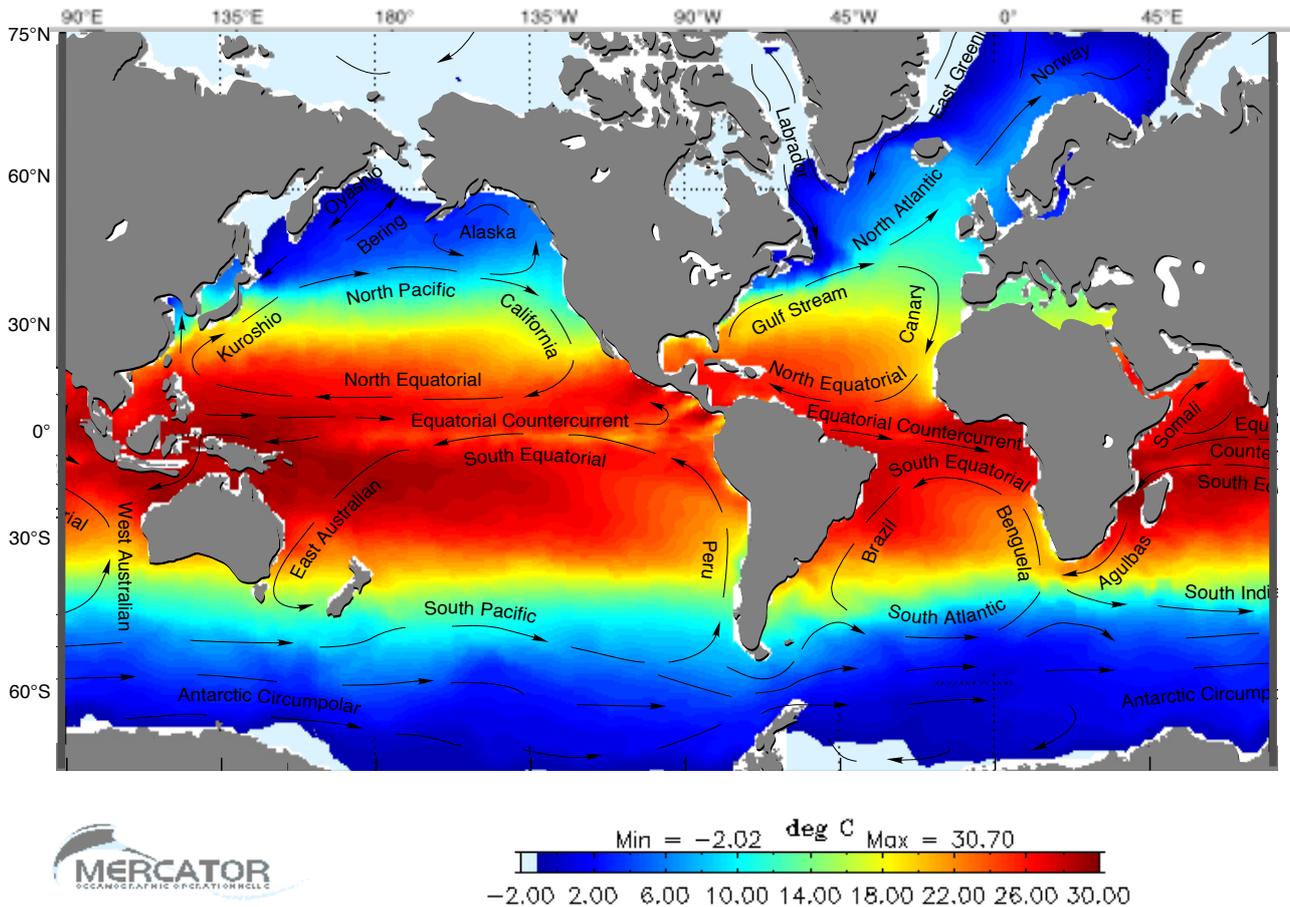


Les flux de chaleur entre l'océan et l'atmosphère

ANNEXES



Carte satellite des températures en surface des océans.



Grands courants océaniques de surface superposés à la carte satellite des températures