

France



Dossier pédagogique

Impacts du changement climatique sur l'océan

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

Conception MobiScience.Briand



Copyright @ESERO France, CNES, ESA – 2020

Impacts du changement climatique sur l'océan

Ce dossier propose une investigation en classe pour découvrir les impacts du changement climatique sur l'océan. Sont présentés : dans un premier temps les modifications des caractéristiques de l'hydrosphère, dans un second temps les effets induits sur la machine océanique et la régulation du climat et, pour finir, quelques exemples de conséquences sur la vie marine.

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 : *Explorer et expliquer certains éléments de météorologie et de climatologie. Relier les connaissances scientifiques sur les risques naturels (ex. cyclones, inondations) et liés aux activités humaines (changement climatique) aux mesures de prévention, protection, d'adaptation, ou d'atténuation. Différence entre météo et climat, prévisions.*
- Physique/Chimie : *Gaz à effet de serre, changements d'état, transferts d'énergie, impact du réchauffement climatique sur les glaciers et la banquise. Variation de la masse volumique avec la température (cause de l'élévation du niveau des océans en lien avec le réchauffement).*
- Géographie : *Mer et Océans, Effets régionaux et mondiaux du changement climatique*

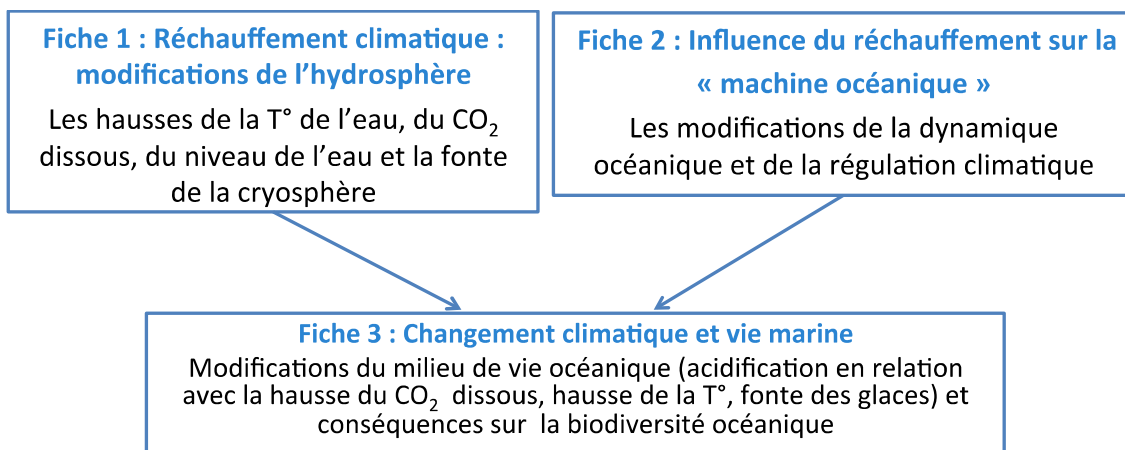
Démarche d'investigation

L'approche pédagogique proposée place les élèves en situation de recherche et permet de travailler les compétences :

- Raisonner, mener une investigation,
- Exploiter des documents,
- Pratiquer des démarches scientifiques, concevoir, réaliser, modéliser
- Utiliser des langages mathématiques, scientifiques et informatiques

Fiches pédagogiques

Ce dossier est composé de 3 fiches qui présentent chacune une démarche pédagogique avec une fiche élève photocopiable pour la trace écrite des élèves. Elles peuvent être traitées successivement :



En fin de dossier, des prolongements ainsi qu'un « *En savoir plus* » fournissent des informations complémentaires qui pourront enrichir en classe les connaissances sur les notions abordées.

Fiche « Réchauffement climatique : modifications de l'hydrosphère »

Cette fiche permet de découvrir des modifications de l'hydrosphère en relation avec le réchauffement climatique actuel grâce à l'exploitation de documents issus de la Recherche et à la modélisation qui permettra d'établir des relations. L'approche pédagogique mobilisera les compétences : *analyser des documents, modéliser, concevoir et représenter*.

⇒ **Introduction.** Le sujet sera abordé par une mobilisation des connaissances des élèves sur les causes du changement climatique actuel : activité humaine, libération de gaz à effet de serre (CO₂...). On proposera d'étudier les conséquences du réchauffement sur les caractéristiques de l'hydrosphère, observées et mesurées localement (in situ) et globalement grâce aux satellites (depuis l'espace).

⇒ **Analyse de documents.** En premier, la fiche élève permet de dresser des constats globaux :

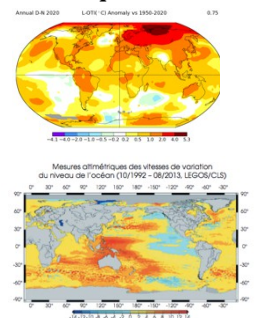
-Paragraphe 1 (travail individuel) et 2 (mise en commun) : Les documents amènent à découvrir les grandes tendances évolutives de caractéristiques hydrosphériques. Certaines variations peuvent être précisées par des calculs.

On pourra compléter ces connaissances, en expliquant par exemple la boucle de rétroaction (amplification du réchauffement) provoquée par la fonte des glaces (Cf. Albédo dans le *En savoir plus*).

-3 (travail collectif) : L'analyse des cartes satellites en annexe A et B du dossier montre qu'il existe de fortes variabilités régionales dans les changements de l'océan :

→ Carte des variations de T° de surface entre 1950 et 2020 : les effets du réchauffement climatique se font davantage ressentir dans les régions polaires. (La zone Arctique s'est plus réchauffée : plus de 5° qu'en 1950 !).

→ Carte de vitesse de variation du niveau de la mer : le niveau marin n'augmente pas à une vitesse uniforme (Par ex, en 20 ans, l'océan Pacifique ouest tropical s'est élevé 3 fois plus vite que la moyenne alors que sur la côte ouest américaine, le niveau diminue de 1 à 2 mm/an !).



L'existence de ces disparités importantes sera notée dans la fiche élève.

Cartes satellites de T° et niveau de mer

⇒ **Mise en relation et modélisation expérimentale.**

-4 : On se questionnera sur les liens possibles entre les variations de T°, de CO₂, du niveau de l'eau et de la fonte des glaces et on demandera aux élèves de concevoir et réaliser des dispositifs analogiques pour tester les hypothèses.

→ Pour tester les effets de la fonte des glaces sur le niveau marin, on demandera de distinguer les cas des glaces continentales (glaciers, calottes) et des glaces de mer (banquise).

→ On testera également une possible influence de l'augmentation de T° et de CO₂ sur le niveau de l'eau.

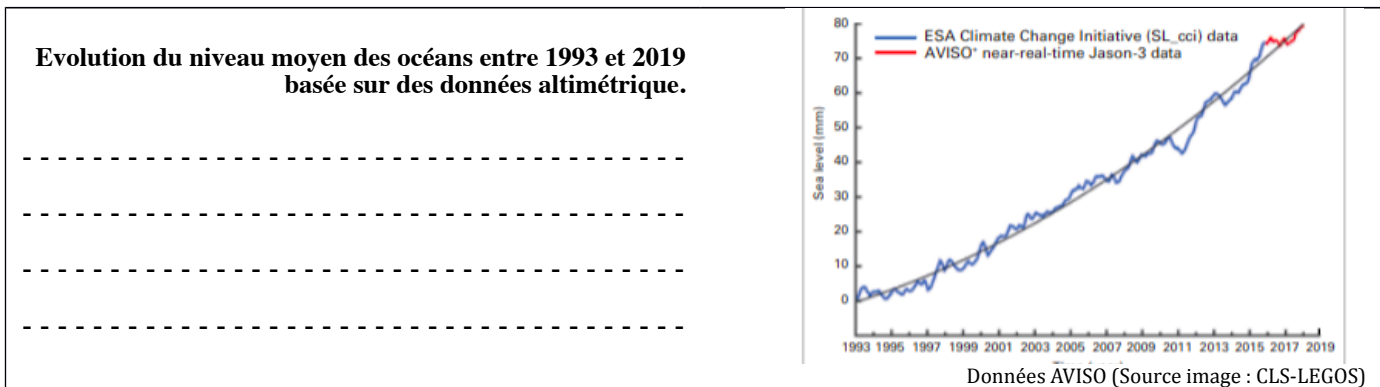
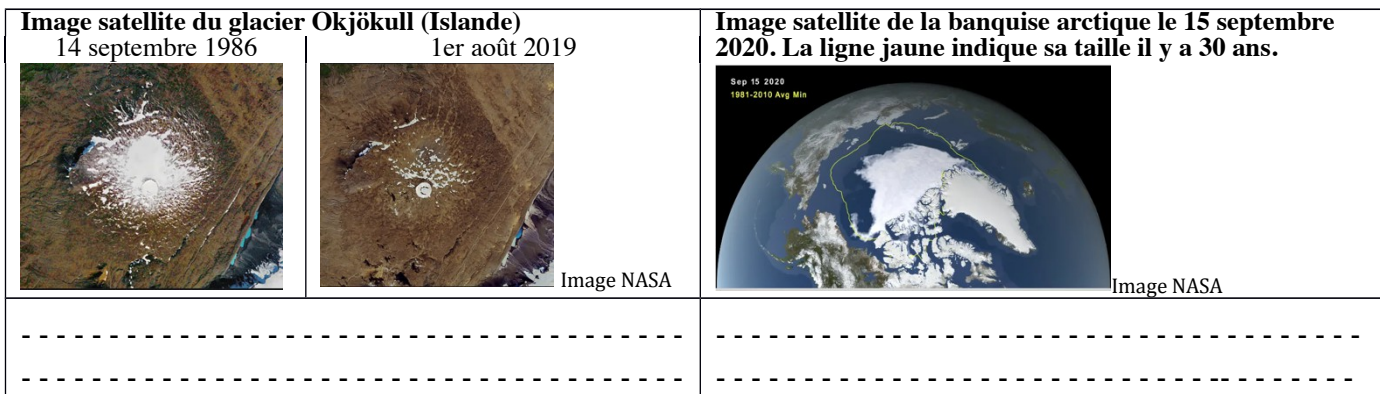
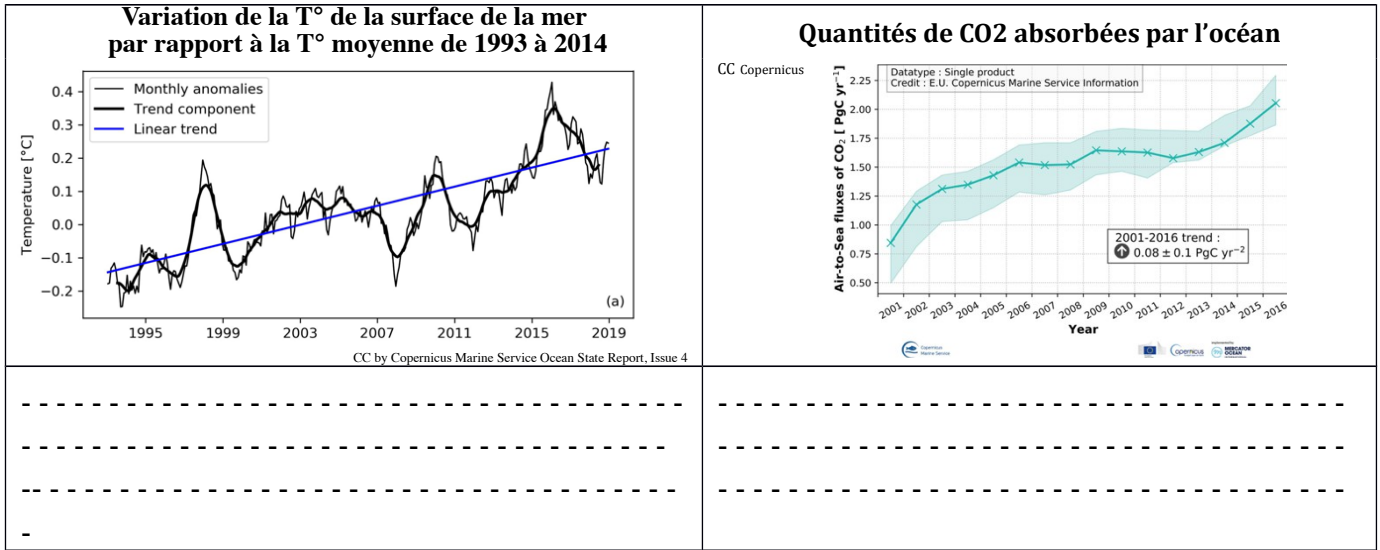
Ces expériences pourront être schématisées (Cf. fiche élève corrigée). Elles permettent d'établir que la hausse de niveau marin est liée à la fonte des glaces continentales et à la dilatation thermique, et non à la fonte de la banquise ou à l'augmentation du CO₂. La variation de la masse volumique avec la T° pourra être approfondie.

⇒ **Bilan.**

-5 : En synthèse, on élaborera une carte mentale des relations entre *réchauffement climatique, augmentation de T° de l'eau, fonte de glaces continentales (glaciers, calottes), fonte des glaces de mer (banquises) et augmentation du niveau marin* (Cf. fiche élève corrigé, à titre d'exemple).

Le suivi de l'évolution des caractéristiques de l'hydrosphère permet de caractériser le réchauffement climatique, en augmentation actuellement. Les conséquences de ces modifications sur la régulation climatique océanique et sur la biodiversité sont abordées dans les fiches suivantes.

1 → Notez les évolutions globales que révèlent les documents ci-dessous :



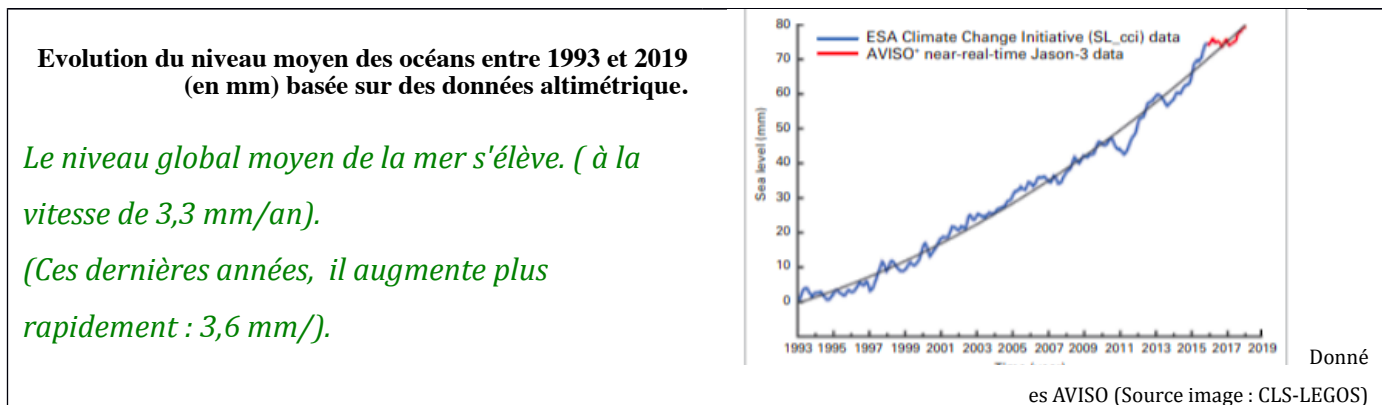
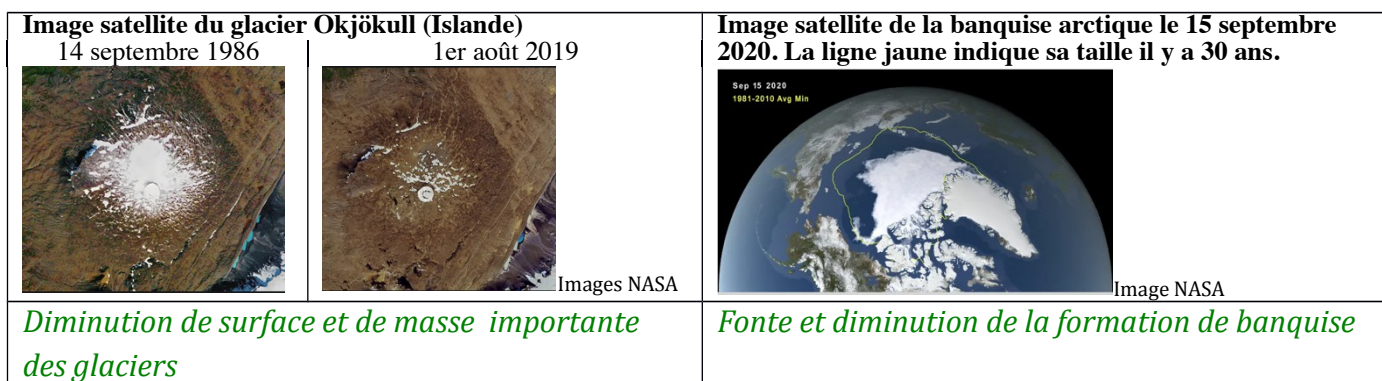
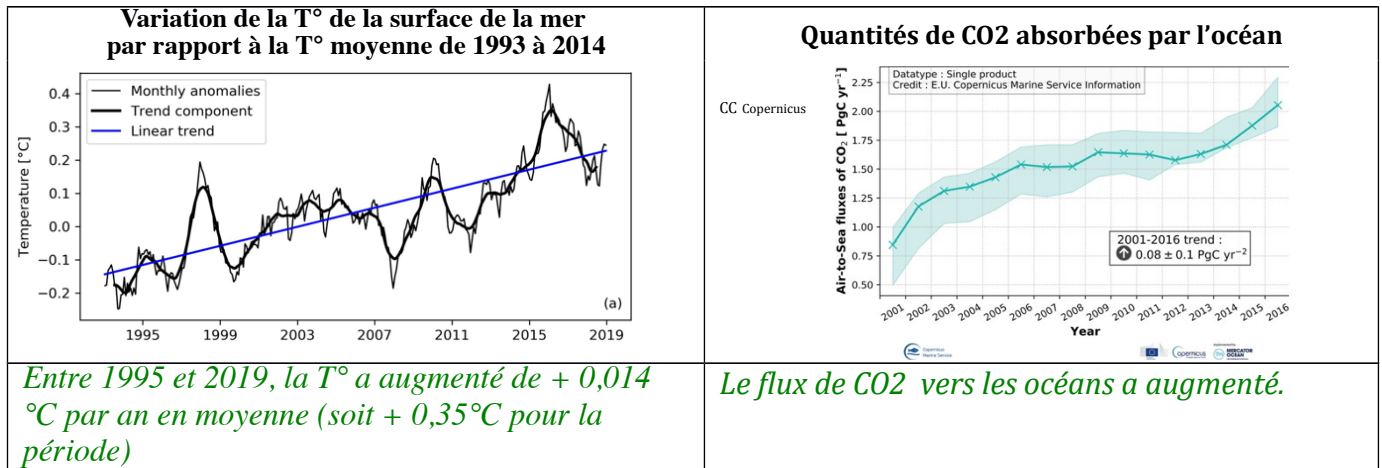
2 → Résumez les changements observés face au changement climatique actuel : -----

3 → Qu'apportent les cartes satellites de T° et de niveau de mer (annexes) comme précisions ?

4 → Quels liens peut-on établir entre T°, CO2, glaces et niveau des mers ? Réalisez des expériences analogiques pour tester vos hypothèses et concluez.

5 → Faites une carte mentale récapitulant les liens entre réchauffement du climat et conséquences sur les caractéristiques de l'hydrosphère.

1 → Notez les évolutions globales que révèlent les documents ci-dessous :



2 → Résumez les changements observés face au changement climatique actuel : *Le réchauffement climatique entraîne une augmentation de la quantité de CO₂ dans l'eau et de la température des océans, une fonte des glaces (cryosphère) et une augmentation du niveau de la mer.*

3 → Qu'apportent les cartes satellites de T° et de niveau de mer (doc annexes) comme précisions ? *Même si la température et le niveau des océans augmentent en moyenne, on observe des variations locales très importantes : zones qui se réchauffent davantage, d'autres qui refroidissent; zones où le niveau marin augment beaucoup, d'autres où il diminue !*

4 → Quels liens peut-on établir entre T°, CO₂, glaces et niveau des mers ? Réalisez des expériences analogiques pour tester vos hypothèses et concluez. **Ci-après**

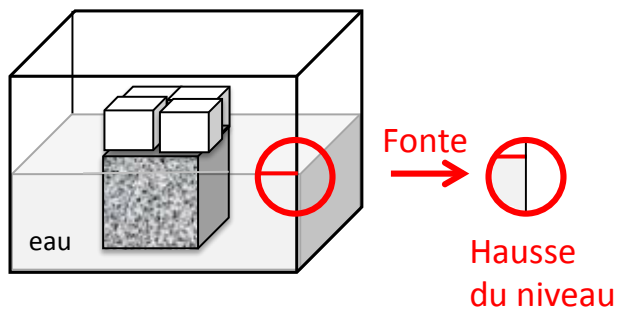
5 → Faites une carte mentale récapitulant les liens entre réchauffement du climat et conséquences sur les caractéristiques de l'hydrosphère.

Ci-après

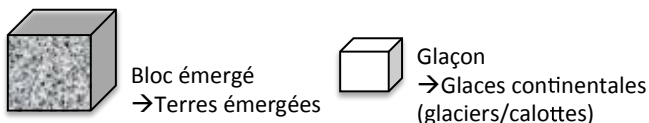
Variation du niveau de l'eau

Exemple de dispositif modélisant l'influence de la fonte des glaces sur le niveau de l'eau
(penser à faire une marque pour le niveau initial de l'eau)

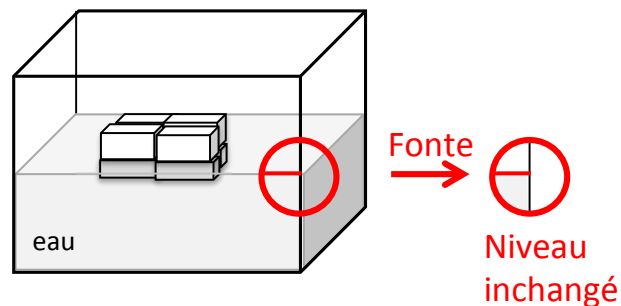
Expérience 1: glaces émergées



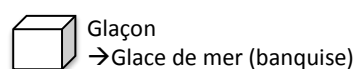
Légende (et analogies) :



Expérience 2: glaces dans l'eau



Légende (et analogie) :



La fonte des glaces continentales contribue à la hausse du niveau marin, pas celle de la banquise.

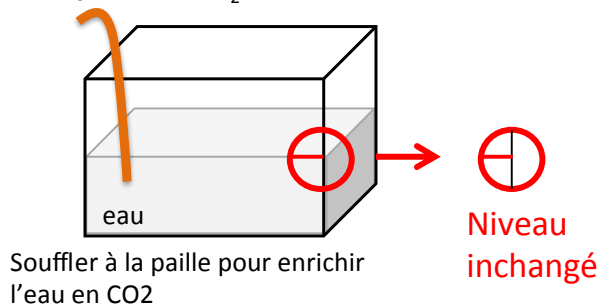
Exemple de dispositif modélisant l'influence de la température et du CO₂ sur le niveau de l'eau

Expérience : température



Placer la bouteille en verre remplie d'eau (très) froide dans un bac d'eau (très) chaude

Expérience : CO₂

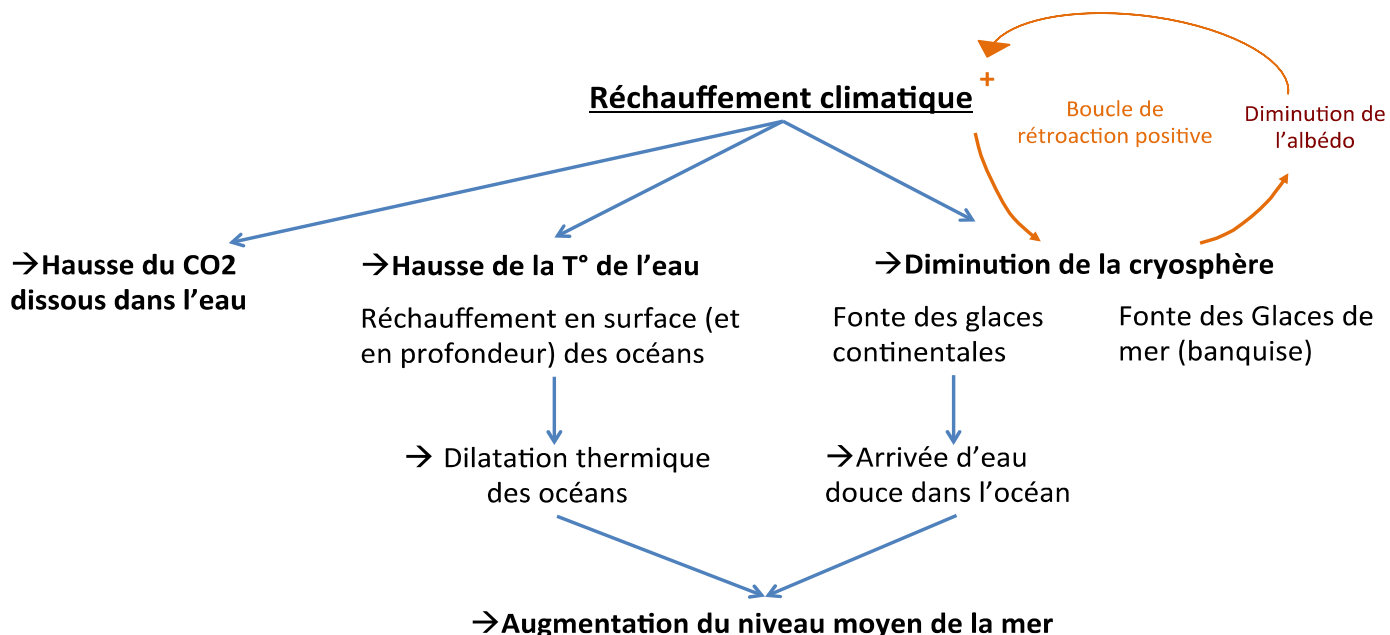


Souffler à la paille pour enrichir l'eau en CO₂

L'augmentation de température provoque la dilatation de l'eau.

*→ **Bilan** : Seules la fonte des glaces continentales et l'augmentation de T° de l'eau (dilatation thermique) entraînent la hausse de niveau marin.*

Impacts du réchauffement climatique sur l'hydrosphère (carte mentale)



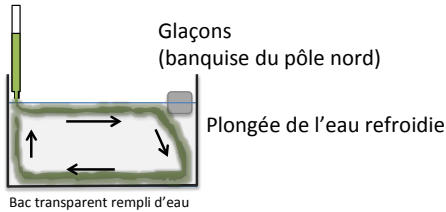
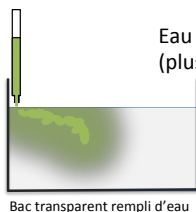
Fiche « Réchauffement climatique et machine océanique »

Provoquant un stockage supplémentaire d'énergie, le changement climatique actuel modifie les équilibres de la dynamique des océans et de la régulation climatique. Ces notions seront découvertes en travaillant les compétences « *modéliser et exploiter des documents* » et permettront de remobiliser certains acquis des élèves sur la dynamique des océans (Circulation thermohaline, cf. Dossier ESERO « *La machine océanique* »).

⇒ **Introduction.** On se demandera si le réchauffement climatique peut avoir des conséquences sur la dynamique océanique et sa régulation climatique.

⇒ **Investigation.** S'appuyant sur leurs connaissances de la circulation thermohaline, les élèves formuleront l'hypothèse qu'une hausse de T° , diminuant la densité de l'eau, peut ralentir la plongée convective des eaux polaires et donc la circulation océanique globale. En s'inspirant des dispositifs utilisés dans les études précédentes, ils testeront et pourront valider cette hypothèse. La fiche élève (→1) fournit un schéma à compléter pour synthétiser.

Exemple de 2 expériences comparatives, permettant une analogie avec l'océan Atlantique nord:

Expérience analogique 1	Expérience analogique 2
<p>Burette d'eau chaude colorée (eau chauffée par le soleil à l'équateur)</p>  <p style="text-align: center;">Bac transparent rempli d'eau</p>	<p>Burette d'eau chaude colorée (eau chauffée par le soleil à l'équateur)</p>  <p style="text-align: center;">Bac transparent rempli d'eau</p>

Le dispositif 1 permet de visualiser la mise en place d'une boucle de convection thermique alors que le dispositif 2, sans glaçon, n'entraîne pas de convection ni plongée d'eau.

(N.B. Le ralentissement de la plongée est aussi accru par la fonte des glaces continentales polaires, l'apport d'eau douce baissant la salinité et donc la densité des eaux marines.)

⇒ **Exploitation de document.**

→2 : L'exemple du Gulf Stream permet de réfléchir aux répercussions climatiques possibles d'un ralentissement de la circulation thermohaline.

Le texte descriptif permet de repérer et caractériser ce courant (qui pourra également être visualisé sur les cartes satellites fournies en annexe C).

On réalisera qu'une diminution de la plongée arctique ralentit l'arrivée des masses d'eaux compensatrices du *Gulf Stream*, diminue le transport de chaleur vers les latitudes européennes et refroidit ainsi le climat européen.

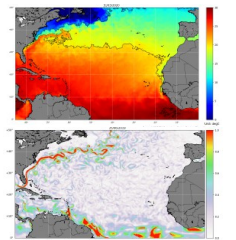
Paradoxalement, le réchauffement climatique peut entraîner des refroidissements régionaux !

→3 : L'étude du cyclone Katrina (carte fournie en annexe D) illustre que la force du cyclone est dépendante de caractéristiques océaniques. Les événements météo extrêmes, liés aux échanges de chaleur et d'eau (évaporation/précipitations) entre océan et atmosphère, peuvent ainsi être amplifiés par le réchauffement climatique. Cet exemple fournit l'occasion de traiter les transferts d'énergie lors des changements d'état avec la T° et de distinguer *climat* et *météo*. Les phénomènes de courte durée relèvent de la météo mais leur fréquence ou intensité indique une tendance climatique.

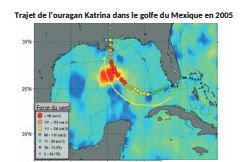
L'investigation pourra se poursuivre avec d'autres exemples météo (tempêtes, canicules, vagues submersion) ou climatiques (oscillation El Nino, vagues de chaleur, voir « *En savoir plus* »).

En bilan, on notera sur la fiche élève que le réchauffement climatique actuel perturbe la dynamique océanique et altère la régulation climatique.

L'océan et l'atmosphère interagissant en permanence, les phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes pourraient augmenter en intensité et en fréquence.

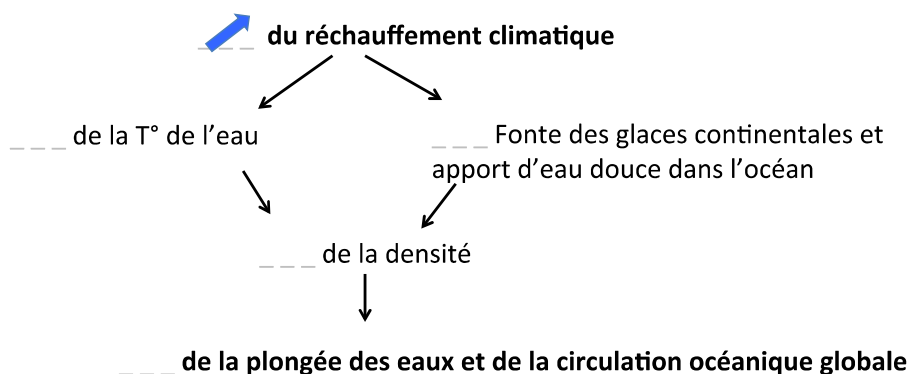


Cartes satellites
(Cf. annexe C)



Cyclone Katrina
(Cf. annexe D)

1→A l'aide des résultats observés aux dispositifs expérimentaux, complétez le schéma ci-dessous par des flèches indiquant l'augmentation (↗) ou la diminution (↘) des phénomènes reliés.

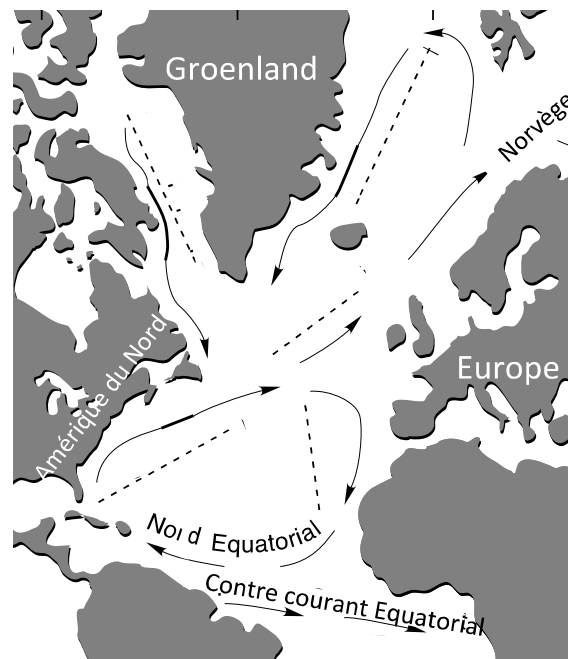


Influence du réchauffement climatique sur la dynamique océanique.

2→ À l'aide du texte descriptif ci-dessous, complétez la carte des courants marins nord Atlantique :

- écrivez le nom des courants marins manquants,
- colorez les flèches : en rouge pour les courants chauds et en bleu pour les courants froids.
- épaississez les flèches représentant les courants puissants

Le **Gulf Stream** est un très puissant courant formé par la convergence du courant Nord équatorial et du courant de Floride. Une partie du Gulf Stream va ensuite circuler vers le sud en formant le courant des Canaries, une autre partie va continuer vers le nord-est en formant la dérive Nord Atlantique (qui se prolonge par le courant de Norvège). Au contraire de ces courants chauds qui transportent de la chaleur, deux courants froids de l'Arctique se déplacent vers le sud le long des côtes du Groenland : le courant Est Groenlandais (qui transporte des icebergs et de la banquise) et le courant du Labrador qui vient converger avec les eaux du Gulf Stream.



Carte des courants de surface nord Atlantique

Indiquez quelles conséquences pourrait avoir un ralentissement de la circulation thermohaline en complétant le texte ci-dessous par des flèches indiquant l'augmentation (↗) ou la diminution (↘).

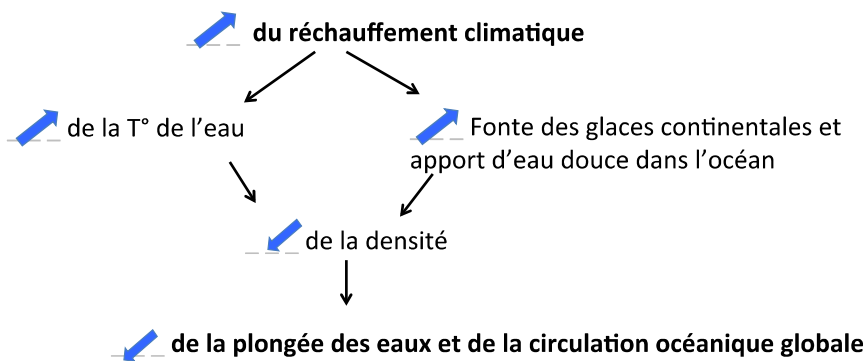
Les masses d'eaux denses (froides et salées) entraînées par la plongée en Arctique sont compensées en surface par l'arrivée du Gulf Stream. Si la plongée diminue, le Gulf Stream Le transport de chaleur vers le Nord Est La température du climat européen pourrait

3→En quoi l'exemple du cyclone Katrina montre que cet évènement météorologique extrême est lié aux caractéristiques de l'océan ?

Pourquoi le réchauffement climatique peut-il avoir une influence sur la force des phénomènes météorologiques extrêmes tels les cyclones ?

Bilan général : -----

1→ A l'aide des résultats observés aux dispositifs expérimentaux, complétez le schéma ci-dessous par des flèches indiquant l'augmentation (↗) ou la diminution (↘) des phénomènes reliés.



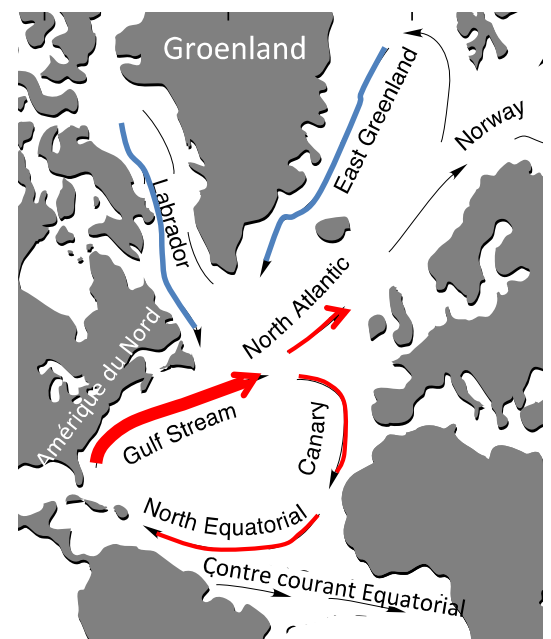
Influence du réchauffement climatique sur la dynamique océanique.

2→ À l'aide du texte descriptif ci-dessous, complétez la carte des courants marins nord Atlantique :

- écrivez le nom des courants marins manquants,
- colorez les flèches : en rouge pour les courants chauds et en bleu pour les courants froids.
- épaississez les flèches représentant les courants puissants

Le **Gulf Stream** est un très puissant courant formé par la convergence du courant Nord équatorial et du courant de Floride. Une partie du Gulf Stream va ensuite circuler vers le sud en formant le courant des Canaries, une autre partie va continuer vers le Nord Est en formant la dérive Nord Atlantique (qui se prolonge par le courant de Norvège).

Au contraire de ces courants chauds qui transportent de la chaleur, deux courants froids de l'Arctique se déplacent vers le sud le long des côtes du Groenland : le courant Est Groenlandais (qui transporte des icebergs et de la banquise) et le courant du Labrador qui vient converger avec les eaux du Gulf Stream.



Carte des courants de surface nord Atlantique

Indiquez quelles conséquences pourrait avoir un ralentissement de la circulation thermohaline en complétant le texte ci-dessous par des flèches indiquant l'augmentation (↗) ou la diminution (↘).

Les masses d'eaux denses (froides et salées) entraînées par la plongée en Arctique sont compensées en surface par l'arrivée du Gulf Stream. Si la plongée diminue, le Gulf Stream Le transport de chaleur vers le Nord Est La température du climat européen pourrait.....

3→ En quoi l'exemple du cyclone Katrina montre que cet évènement météorologique extrême est lié aux caractéristiques de l'océan ?

La force du cyclone (vitesse des vents) augmente en passant au dessus d'une zone océanique où le niveau de l'eau est anormalement haut.

Pourquoi le réchauffement climatique peut-il avoir une influence sur la force des phénomènes météorologiques extrêmes tels les cyclones ?

Le réchauffement peut avoir une influence car il modifie les caractéristiques des océans.

Bilan général : le réchauffement climatique a un impact sur la circulation océanique et la régulation climatique

Fiche « Changement climatique et vie marine »

La modification des caractéristiques et des équilibres océaniques par le changement climatique change le milieu de vie marin, avec des conséquences sur les êtres qui y vivent. Ces aspects seront abordés en faisant appel aux compétences : *analyser des expériences, raisonner, exploiter des documents*.

⇒ **Introduction.** On demandera aux élèves de citer quelques exemples illustrant que les espèces marines sont dépendantes de leur milieu. On s'intéressera alors à l'impact que peuvent avoir les modifications des eaux océaniques liées au changement climatique. Trois exemples seront traités, un par investigation puis deux par exploitation de documents.

⇒ **Investigation.** On réalisera tout d'abord 2 expériences simples, en démonstration ou réalisées par les élèves, pour mettre en évidence les conséquences de l'augmentation du CO₂ dissous sur le pH et le calcaire (carbonate de calcium):

Expérience 1 : souffler régulièrement dans un bocal d'eau à l'aide d'une paille et de mesurer le pH de l'eau au fil du temps avec pH-mètre, ou papier pH. En 2 à 3 mn, on observe une baisse de pH.

→ Le pH de l'eau diminue quand on ajoute du CO₂ : il y a acidification.

Expérience 2 : placer des coquillages dans des liquides d'acidité croissante (ex vinaigre blanc). → Plus le liquide est acide plus on observe la dissolution du carbonate des coquilles.

Expérience 2. DR



La fiche élève réutilise ces observations, en transposant au milieu marin :

- Le graphique de variation de pH montre que l'océan s'acidifie (il reste cependant basique). Cette diminution de pH peut être mise en relation avec une absorption océanique du CO₂ émis dans l'air par les activités humaines.

- Cette acidification du milieu de vie océanique est susceptible de perturber le développement d'espèces à squelette ou coquille calcaire (plancton, coraux, mollusques...) et donc d'affecter les réseaux trophiques et les écosystèmes marins.

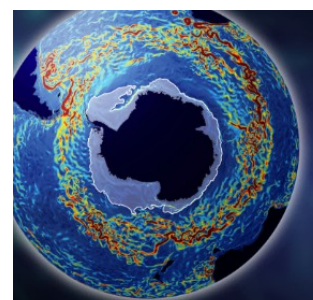
N.B. : L'acidification peut aussi entraîner des rétroactions sur le climat, avec la diminution du stockage de carbone par la « pompe biologique » océanique (Cf. En savoir plus).

⇒ **Exploitation de documents.** On indiquera en préalable que pour mieux connaître les animaux, on peut les équiper de balises Argos, qui transmettent leurs localisations aux satellites, et suivre leurs déplacements. La fiche élève propose l'étude de 2 exemples pour découvrir l'impact que pourrait avoir le changement climatique :

- Le manchot royal. Avec l'augmentation de la T° de l'eau, la zone d'isotherme 5°C du front polaire, caractérisée par la rencontre d'eaux froides et d'eaux chaudes dans le subantarctique, se déporte vers le pôle sud. L'éloignement de cette zone aux proies abondantes augmente la distance à parcourir par le manchot pour nourrir son petit à terre.

Une zone de tourbillons : le front polaire

Modélisation de la vitesse des eaux
En bleu/vert : courants marins lents ;
En orange/rouge : courants rapides



- L'ours polaire. Dépendant de l'existence de la banquise pour la chasse du phoque annelé, il est classé espèce vulnérable en raison de l'augmentation de la fonte des glaces de mer. Les deux-tiers de la population mondiale pourraient disparaître d'ici 2050.

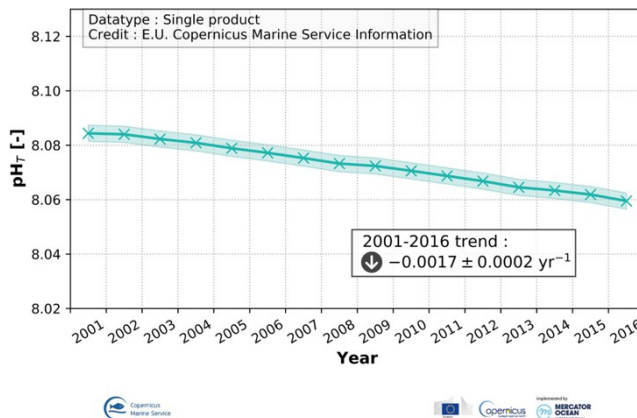
En bilan général, on notera sur la fiche élève que le changement climatique, modifiant le milieu de vie océanique, a des conséquences sur les écosystèmes marins.

Certains écosystèmes ou espèces sont particulièrement impactés par le changement climatique (récifs coralliens, habitats profonds, espèces polaires...).

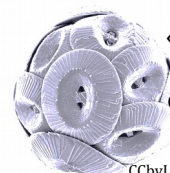
Les moyens de protection, la lutte contre le réchauffement climatique seront des perspectives intéressantes à aborder avec les élèves.

→ Comment expliquer l'évolution du pH moyen de l'océan ?

Graphique de l'évolution du pH moyen des océans en surface :



→ Si l'océan devient trop acide, que peut-il se produire pour certains êtres vivants marins, comme les « coccolithes » ?



« Coccolithe », algue microscopique couverte de plaques calcaires.

CCbyLondonNHMRoscoff 2.5

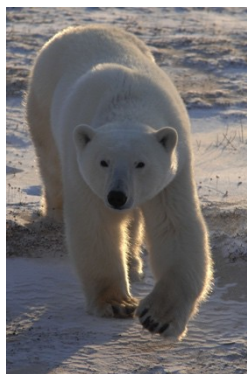
→ A l'aide des documents ci-dessous, indiquez ce que le réchauffement pourrait avoir comme impact sur l'ours polaire et le manchot.



Les manchots royaux partagent leur vie entre la terre, où ils se reproduisent et muent, et l'océan où ils pêchent des poissons pour se nourrir.

On observe que les manchots des îles subantarctiques Crozet et Kerguelen vont se nourrir à plus de 500 km de leur île dans une zone où la nourriture est abondante. Cette zone, caractérisée par des eaux de T° de 4 à 5°C en surface, se nomme le front polaire. De retour sur l'île, les manchots nourrissent leurs petits en régurgitant. Les années « chaudes », ce front polaire est plus au sud que la normale.

Un manchot royal équipé d'une balise Argos. Grâce aux satellites la balise transmet la localisation du manchot dans l'océan. C.Bost



Les ours polaires vivent la majeure partie de leur vie sur la banquise arctique pour chasser les phoques dont ils se nourrissent principalement. En effet, les phoques font leurs petits dans des abris dans la banquise et maintiennent des trous dans la banquise pour venir y respirer. Une banquise avec une épaisseur comprise entre 1,2 et 1,7 m est le territoire de chasse parfait pour les ours polaires.

Cette alimentation entraîne un stockage de graisse (jusqu'à 30 cm d'épaisseur sous la peau) qui leur permet de jeûner les mois où la banquise est fondue.

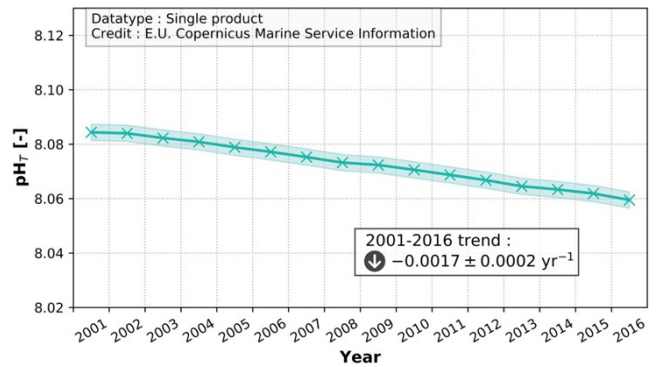
La balise Argos, mise en collier autour du cou de l'ours, permet de connaître ses zones de chasse. ©Andrew E. Derocher, Université d'Alberta

Bilan général :

→ Comment expliquer l'évolution du pH moyen de l'océan ?

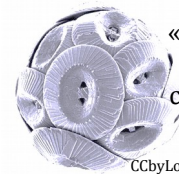
Graph de l'évolution du pH moyen des océans en surface :

Le pH des océans diminue (8,08 en 2000 / 8,06 en 2016). Cette acidification est due à l'augmentation de la quantité de CO₂ dissous dans les océans (en relation avec la hausse de CO₂ atmosphérique due aux activités humaines).



→ Si l'océan devient trop acide, que peut-il se produire pour certains êtres vivants marins, comme les « coccolithes » ?

Le calcaire se dissout en milieu acide. Si l'océan devient trop acide, les êtres vivants qui ont du calcaire peuvent rencontrer des problèmes de développement ou de formation.



« Coccolithe », algue microscopique couverte de plaques calcaires.

CCByLondonNHMRoscoff 2.5

→ A l'aide des documents ci-dessous, indiquez ce que le réchauffement pourrait avoir comme impact sur l'ours polaire et le manchot.

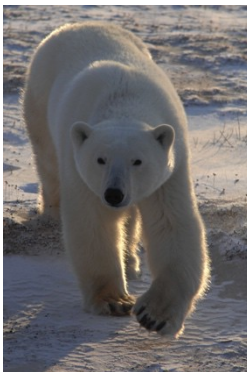


Les manchots royaux partagent leur vie entre la terre, où ils se reproduisent et muent, et l'océan où ils pêchent des poissons pour se nourrir.

On observe que les manchots des îles subantarctiques Crozet et Kerguelen vont se nourrir à plus de 500 km de leur île dans une zone où la nourriture est abondante. Cette zone, caractérisée par des eaux de T° de 4 à 5°C en surface, se nomme le front polaire. De retour sur l'île, les manchots nourrissent leurs petits en régurgitant. Les années « chaudes », ce front polaire est plus au sud que la normale.

Un manchot royal équipé d'une balise Argos. Grâce aux satellites la balise transmet la localisation du manchot dans l'océan. C.Bost

Avec le réchauffement climatique, la température des eaux augmente. Le « front polaire » se déplace vers le pôle sud et s'éloigne de l'île des manchots. Si les parents manchots mettent trop longtemps à revenir sur l'île, leurs petits peuvent mourir de faim.



Les ours polaires vivent la majeure partie de leur vie sur la banquise arctique pour chasser les phoques dont ils se nourrissent principalement. En effet, les phoques font leurs petits dans des abris dans la banquise et maintiennent des trous dans la banquise pour venir y respirer. Une banquise avec une épaisseur comprise entre 1,2 et 1,7 m est le territoire de chasse parfait pour les ours polaires.

Cette alimentation entraîne un stockage de graisse (jusqu'à 30 cm d'épaisseur sous la peau) qui leur permet de jeûner les mois où la banquise est fondue.

La balise Argos, mise en collier autour du cou de l'ours, permet de connaître ses zones de chasse. ©Andrew E. Derocher, Université d'Alberta

Avec le réchauffement, les glaces de mer fondent : la surface et l'épaisseur de la banquise diminuent. Le territoire et la période de chasse des ours polaires diminuent, ce qui les affaiblit.

Bilan général : Le changement climatique modifie le milieu de vie océanique : l'augmentation du CO₂, la hausse de la T° des eaux et la fonte des glaces ont un impact sur les écosystèmes marins.

Prolongements

Si à l'échelle des temps géologiques, le climat a toujours varié (périodes glaciaires/interglaciaires...) sous l'influence de facteurs naturels (cycles de l'activité solaire, changements d'orbite terrestre, inclinaison de la terre, éruptions volcaniques...), le réchauffement climatique global actuel, rapide, est lié à l'activité humaine.

L'étude des « *impacts du changement climatique sur l'océan* » proposée par ce dossier établit des relations de cause à effet entre les phénomènes en jeu. Les différentes notions ont été organisées selon un fil conducteur, aussi pourra-t-il être intéressant d'établir une carte mentale récapitulative globale des effets du réchauffement climatique sur l'Océan.

L'existence de boucles de rétroaction amplifiant le réchauffement ajoute à la complexité de la machine climatique et explique la difficulté de prévoir l'évolution du réchauffement en cours.

En absorbant plus de 90% de l'excès de chaleur et 30% du dioxyde de carbone excédentaire, l'océan atténue les variations climatiques qui seraient beaucoup plus rapides si seules les autres composantes climatiques (atmosphère, biosphère et lithosphère) étaient impliquées. Mais cela entraîne des modifications importantes pour l'hydrosphère: hausse de la température des eaux, du niveau des océans (entre 0,43 m et 0,84 m en 2100 selon les scénarios), de la quantité de CO₂ dissous, acidification (le pH océanique diminue de ~0.02 par décennie), fonte des glaces.

Ces changements perturbent la dynamique océanique, altèrent la régulation climatique (événements climatiques et météo extrêmes) et ont un impact sur la biodiversité marine et le fonctionnement des écosystèmes. D'autres exemples que ceux abordés dans ce dossier pourront faire l'objet de recherches documentaires et d'exposés. Il sera opportun de faire apparaître les moyens de protection et de prévention.

D'ici 2100, l'océan pourrait absorber 2 à 4 fois plus de chaleur que pendant la période allant de 1970 à l'heure actuelle si le réchauffement planétaire est limité à 2 °C, et jusqu'à 5 à 7 fois plus si les émissions sont plus élevées... Pour agir contre le réchauffement et ses conséquences, on distingue deux types d'action :

- l'atténuation : limiter le réchauffement climatique en réduisant nos émissions atmosphériques et en développant des méthodes qui extraient le dioxyde de carbone de l'atmosphère, en plantant des arbres par exemple ;

- l'adaptation : réduire l'exposition ou la vulnérabilité des personnes, des animaux sauvages et des biens aux différents risques liés au climat qui change.

Des individus aux Etats, la prise de conscience s'est développée ces dernières années et des initiatives pour ralentir le réchauffement climatique naissent même si les politiques mondiales ont des difficultés à se mettre en place. De nombreux ONG et mouvements citoyens s'engagent pour que les mesures nécessaires soient prises et respectées par les Etats.

La connaissance fine des océans permet de comprendre, d'anticiper l'évolution du climat terrestre et d'agir. Dans ce cadre, l'enseignement autour de ces sujets, notamment auprès des plus jeunes est primordial. Le CNES (Centre National des Etudes Spatiales) propose à cette fin de nombreuses ressources éducatives et pédagogiques illustrant [l'apport des technologies du spatial pour la connaissance de notre planète](#).

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

En savoir plus

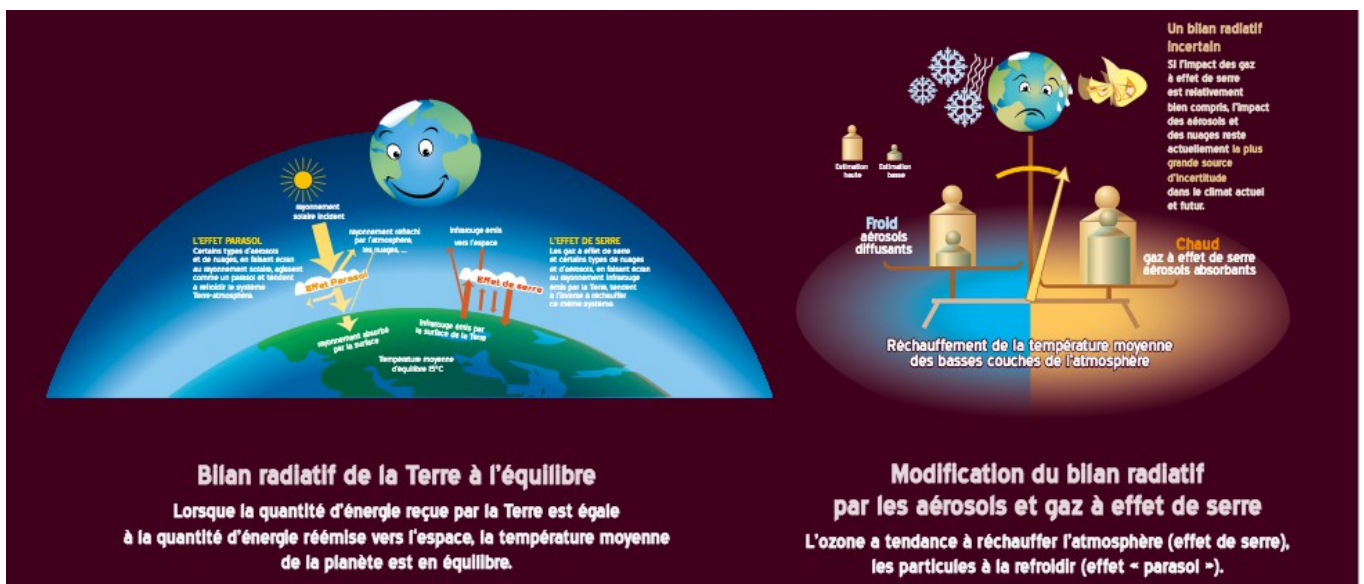
→ Climat, Océan et changement climatique

L'énergie solaire reçue par notre planète, inégalement distribuée selon les latitudes, est responsable de zones climatiques contrastées, de chaudes à l'équateur à froides aux pôles. Ce déséquilibre énergétique est à l'origine de la mise en mouvement des enveloppes fluides terrestres : l'atmosphère gazeuse et l'hydrosphère liquide.

Recouvrant 360 millions de km² de surface (71 % de la surface terrestre), l'océan absorbe la plus grande partie de l'énergie solaire. Grâce à sa dynamique, organisée avec des courants de surface et de profondeur, il permet le transport de chaleur (continuellement entretenu tant que le soleil brillera !) des régions équatoriales recevant le plus de rayonnement vers les zones polaires moins exposées et aussi vers l'océan profond.

La capacité de l'océan à accumuler et à libérer lentement l'énergie lors de sa circulation joue un rôle déterminant pour le climat mondial (voir le dossier « *La machine océanique* »).

Les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, ...) générées par les activités humaines entraînent une modification du bilan radiatif de la Terre par une accumulation supplémentaire d'énergie à la surface terrestre à l'origine du réchauffement climatique actuel.



Réalisation graphique Pôle Multimédia

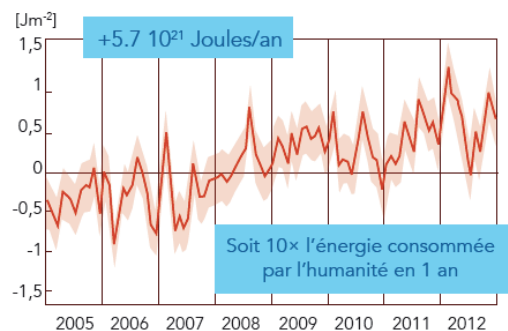
Les activités humaines ont amplifié l'effet de serre naturel de la planète

Par sa masse et sa capacité calorifique 4000 fois supérieure à celle de l'air, l'océan atténue le réchauffement en stockant plus de 90% de la chaleur additionnelle. Les autres composantes du système climatique absorbent le restant de l'énergie excédentaire générée par le changement climatique:

- 1 % à 2 % chauffe l'atmosphère (+ 1 °C en un siècle),
- 3 % est consommé par la fonte des glaces
- 5 % augmente la température des sols

Dans l'ensemble, la température moyenne de la Terre a augmenté de plus de 1°C depuis les années 1880.

Sans l'océan, toute variation climatique serait bien plus rapide et brutale.



Contenu de chaleur de l'océan, mise à jour de Von Schuckmann K. et P.-Y. Le Traon, 2011, *Ocean Science*, 7, 783-791, www.ocean-sci.net/7/783/20 DR

→ Observer l'Océan

Les caractéristiques physico-chimiques de l'océan sont observées à différentes échelles, de façon complémentaire :

- observations in situ, réalisées par des capteurs embarqués, sur des navires océanographiques, dans des "balises" ou des bouées météorologiques.

Ces dispositifs émettent en permanence des données (localisation, température et salinité des océans, pression au niveau de la mer, etc.) vers des satellites en orbite autour de la Terre.

Depuis 1990, on dispose de données sur toute la colonne d'eau grâce à des flotteurs autonomes, au mouvement vertical qui font des mesures jusqu'à plus de 2000 mètres de profondeur et donnent leurs informations tous les 10 jours environ aux satellites du programme Argo.



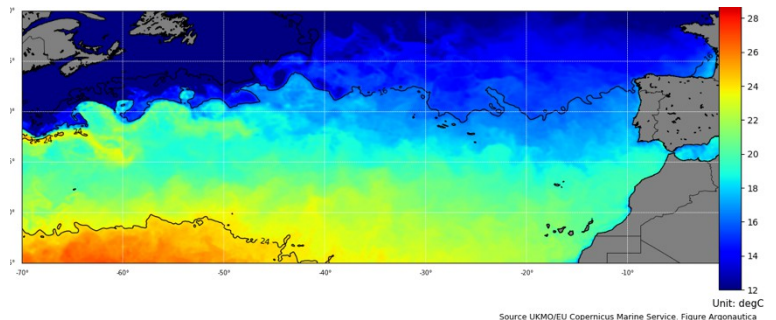
Un réseau international de milliers de flotteurs répartis dans les océans du monde entier.
CC BY Balem Kevin 4.0 (2020)

- observations globales faites depuis l'espace (température de surface de la mer, courants, vent, hauteur des vagues, ...) grâce aux instruments de mesure embarqués par les satellites (charge utile) qui peuvent couvrir des régions très importantes en très peu de temps.

Ces mesures permettent d'établir des cartes satellites globales ou locales et de suivre des évolutions à long ou court terme (quelques jours ou même quelques heures) !

Exemple de carte satellite : températures de surface de l'eau en atlantique nord le 12/05/2020

Toutes ces données sont ensuite combinées et incorporées dans des modèles informatiques afin d'établir des prévisions des évolutions, et notamment celles en relation avec le changement climatique.



→ Variations des caractéristiques de l'hydrosphère avec le changement climatique.

- Augmentation de la température des eaux

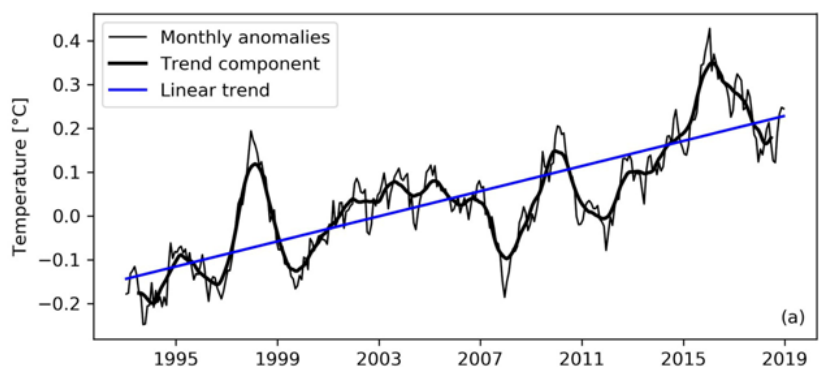
Les mesures de températures des eaux océaniques de surface ont commencé il y a plus de 200 ans. Grâce aux satellites, ces données locales se sont complétées de données à l'échelle du globe. Depuis 1880, on a observé un réchauffement de 0,5 °C des eaux de surface, avec un réchauffement plus rapide ces 50 dernières années.

Pour la période récente, de 1995 à 2019, on observe une augmentation de 0,014 °C par an en moyenne (+0,35°C pour la période).

Variation de la température de la surface de la mer par rapport à la T° moyenne.

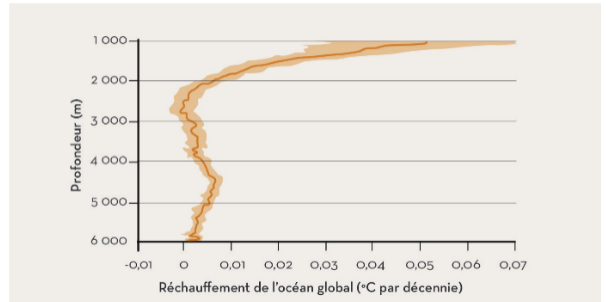
Les variations des courbes noires (Monthly anomalies et Trend component) sont liées à des phénomènes climatiques particuliers comme El Niño.

La ligne bleue (Linear trend) est la tendance linéaire estimée.



De la surface jusqu'à 200 mètres de profondeur (thermocline), la température moyenne de l'océan est de l'ordre de 17,5 °C. Elle décroît ensuite rapidement et s'uniformise entre 0 et 3 °C vers 2.000 mètres de fond.

Avec le réchauffement climatique, en plus d'augmenter en surface, la température augmente également dans toute la colonne d'eau. L'augmentation, même infime, en dessous de 2000m illustre le transport de chaleur des courants profonds jusqu'aux grands fonds dans les régions polaires.



Réchauffement des eaux selon la profondeur de 1981 à 2018 -
Source IPCC, SROCC, 2019 -DR

L'augmentation moyenne de T° des eaux océaniques est en lien direct avec l'absorption supplémentaire de chaleur causée par le réchauffement climatique (50% dans les 700 premiers mètres d'eau, 30 % dans la tranche entre 700 et 2000 mètres de profondeur, moins de 10 % sous les 2000 mètres).

- Diminution de la cryosphère :

Glaces continentales (glaciers et calottes polaires) : On observe des retraits importants des glaciers de montagne et une perte de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'ouest de l'Antarctique malgré une forte inertie thermique (Entre 2006 et 2015, la calotte glaciaire du Groenland a perdu 278 Gt / an et celle de l'Antarctique perd l'équivalent de 155 Gt / an, ce qui correspond respectivement à une hausse du niveau marin de +0,77 et 0,43 mm / an) Quasiment toutes les glaces continentales du monde diminuent en masse et en superficie.

Glaces de mer : La banquise, eau de mer gelée, se forme durant l'hiver polaire, quand la T° de l'eau salée descend en dessous de -1,8 °C. On distingue la banquise pérenne et la banquise saisonnière (appelée aussi banquise « annuelle ») qui se forme en hiver et fond lors de l'été. Le réchauffement climatique entraîne une diminution de la formation de banquise annuelle et une diminution épaisseur et surface banquise pérenne.



Banquise - CC0 Public Domain

Les mesures satellites montrent que depuis 1970, la superficie de la banquise de l'Arctique en été diminue de plus de 10 % tous les 10 ans. A ce rythme, il est probable qu'au cours des prochaines décennies, l'Arctique connaisse des étés totalement dépourvus de glace...

En parallèle on peut noter l'intensification de la fonte des sols glacés du pergélisol.

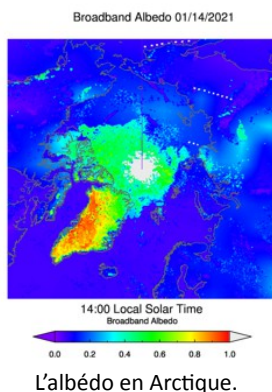
Diminution du pouvoir réfléchissant (Albédo*) : Les surfaces blanches de la cryosphère renvoient vers l'espace l'essentiel de l'énergie lumineuse reçue, comme des miroirs, alors que les roches, végétation ou eau liquide, sombres, sont moins réfléchissantes.

La fonte des glaces entraîne une diminution de l'albédo avec pour effet une absorption beaucoup plus importante d'énergie par la Terre, et donc une rétroaction positive sur le réchauffement climatique (La modification de l'albédo serait responsable de 15% du réchauffement climatique).

* L'albédo a une valeur comprise entre 0 et 1 : un corps noir absorbant toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune aurait un albédo nul ; un miroir réfléchissant toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1.

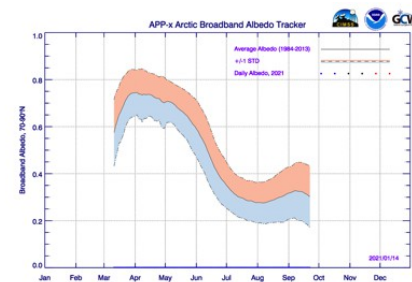
En arctique, les variations de surface de glace et d'albédo sont importantes au cours des saisons.

La rétroaction, importante, entraîne la poursuite de la fonte et de l'élévation du niveau de la mer. Elle est nommée « *amplification de l'Arctique* ».



L'albédo en Arctique.

Source : http://globalcryospherewatch.org/state_of_cryo/seaice/ DR

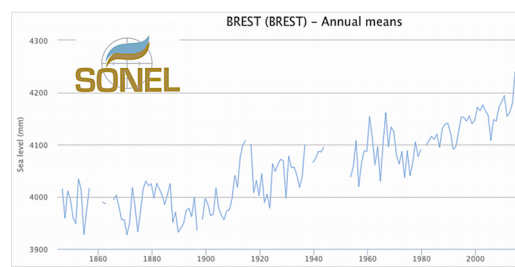


Variations de l'albédo en Arctique au cours de l'année.

- Augmentation du niveau de mer

De longues séries d'observations du niveau marin issues de mesures marégraphiques anciennes puis, dès le XIXe siècle, avec des appareils à enregistrement automatique de plus en plus précis et en continu, ont permis d'observer des augmentations locales du niveau de la mer.

A la fin du XXe siècle, les satellites altimétriques ont révolutionné cette mesure du niveau des océans en permettant une vue globale, fréquente et avec une forte précision (actuellement de quelques dixièmes de mm/an !).



Mesures du niveau de l'eau à Brest depuis 1846.

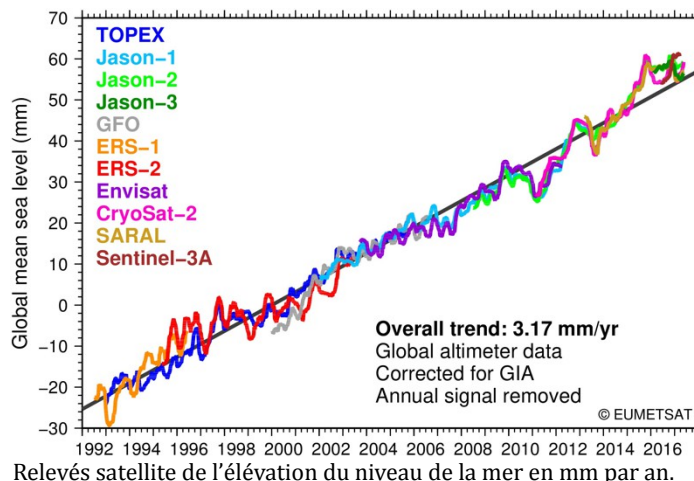
Image DR

Le niveau est mesuré à Brest depuis 1679. Il a augmenté d'environ 25 centimètres depuis 200 ans.

Les variations de niveau ne sont pas identiques partout (importantes disparités locales) mais on peut suivre l'évolution globale moyenne sur la base de données altimétriques satellitaires :

Le niveau marin a augmenté d'environ 15 cm à l'échelle mondiale au cours du XXe siècle avec une hausse actuelle plus de deux fois plus rapide (3,6 mm par an) et qui continue de s'accélérer.

Selon les incertitudes sur l'évolution du réchauffement climatique (écoulement de la glace des calottes polaires vers l'Océan, émissions de gaz à effet de serre ...), le niveau marin pourrait augmenter de 25 cm à plus de 100 cm d'ici 2100 et poursuivre son augmentation.



Relevés satellite de l'élévation du niveau de la mer en mm par an.

Crédits : Courtesy of R. Scharroo/EUMETSAT

Mesuré très précisément par l'altimétrie satellite, le niveau de mer est un indicateur pertinent du changement climatique. L'accélération de la hausse du niveau ces dernières décennies signale l'amplification du réchauffement.

→ Modification de la régulation climatique

- Modification du Gulf Stream :

Un ralentissement de la circulation thermohaline pourrait entraîner un ralentissement du *Gulf Stream* dont les masses d'eaux compensent la plongée des eaux froides arctiques. Dans un premier temps, les eaux chauffées plus longtemps, transporteraient plus d'énergie vers les pôles, réchauffant davantage les eaux arctiques et accélérant la fonte des glaces et ralentissant ainsi la plongée (*boucle de rétroaction positive*). Dans un second temps, l'arrêt du *Gulf Stream* entraînerait des répercussions climatiques importantes dans l'hémisphère nord.

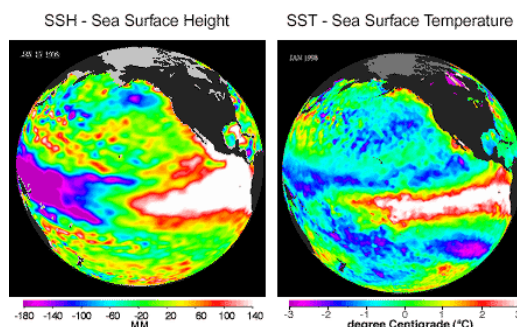
Un tel cas semble déjà avoir été enregistré il y a 13.000 ans, à la fin du dernier épisode glaciaire : l'essentiel de l'eau de la fonte de la calotte canadienne est descendue vers l'océan par le Mississippi, d'immenses lacs et le Saint Laurent se sont mis en place, contribuant ainsi à une baisse brutale de la salinité. La T° moyenne de l'Europe a alors baissé de plusieurs degrés en moins de 50 ans. Depuis plusieurs années, on observe en plein Atlantique nord une température plus basse qu'attendue par les modèles (anomalie basse).

- Oscillations :

Liées au couplage entre les circulations atmosphérique et océanique, ces variabilités influencent régulièrement le climat sur des grandes parties des bassins océaniques :

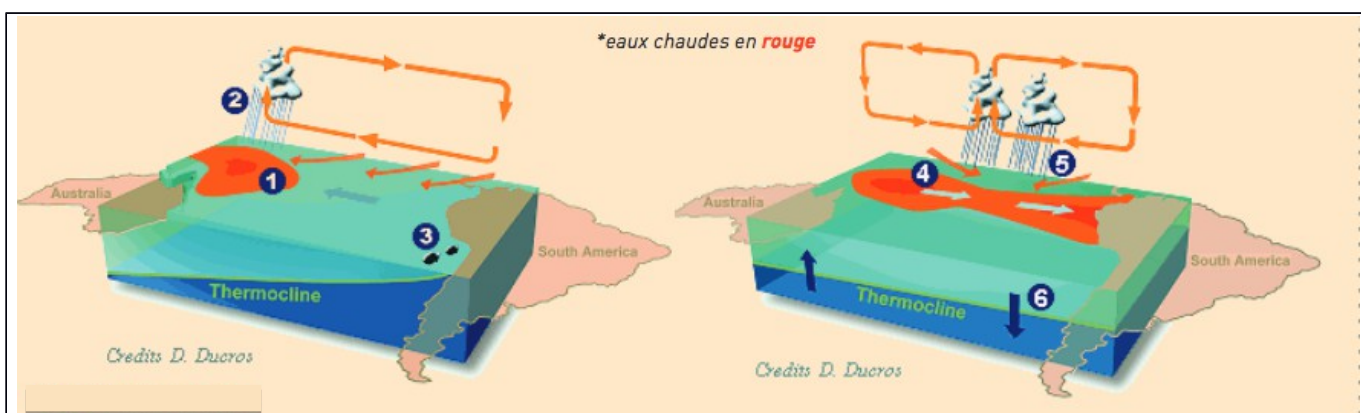
- North Atlantic Oscillation (NAO) dans la zone Nord-atlantique extratropicale,
- North Pacific Oscillation (NPO) dans la zone Nord-pacifique extratropicale,
- El Niño Southern Oscillation (ENSO) dans la zone pacifique tropicale,
- Southern Oscillation (SO) dans l'océan Austral
- Pacific Decadal Oscillation (PDO) en zone Nord pacifique (américaine) et Pacifique tropical

Les images satellites permettent d'observer l'oscillation El Niño (ENSO). Ce phénomène dure plusieurs mois et affecte le climat mondial, entraînant des déficits pluviométriques (Australie orientale, Indonésie, Inde, Afrique australe, Caraïbes, nord-est du Brésil) ou des excédents pluviométriques (côte ouest de l'Amérique du Sud, nord de l'Argentine et Uruguay, Afrique de l'Est équatoriale, îles du centre du Pacifique tropical et sud des États-Unis).



DR© 2001 TOPEX/Poséidon-NASA/JPL

Le réchauffement climatique semble augmenter sa fréquence et son intensité (Les épisodes de 1982-83 et 1997-98 ont été les plus violents depuis 1950).



Le phénomène El Niño

1,2 et 3 : situation « habituelle ». Les alizés font circuler l'eau chaude d'est en ouest, créant un réservoir d'eau chaude jusqu'à 300m de profondeur (1) entraînant d'intenses précipitations autour de l'Indonésie (2) et un phénomène d'upwelling (remontée d'eaux froides et chargées de nutriments à la surface) sur la côte du Pérou (3).

4,5 et 6 : période El Niño : les alizés s'affaiblissent ou disparaissent et des vents soufflant vers l'est apparaissent (4). Le réservoir d'eau chaude se déplace vers l'Est, ainsi que la zone des précipitations et des cyclones qui provoquent des pluies abondantes sur les îles du centre du Pacifique (5), puis sur les côtes de l'Amérique du Sud.

La remontée d'eaux froides et chargées de nutriments favorisant le développement du plancton et d'espèces marines à l'Est ne se fait plus (6), ce qui cause une diminution des populations marines.

- Vagues de chaleur :

Ces épisodes inhabituels de réchauffement des températures de surface de la mer durent de quelques jours à plusieurs mois et peuvent concerner des milliers de km².

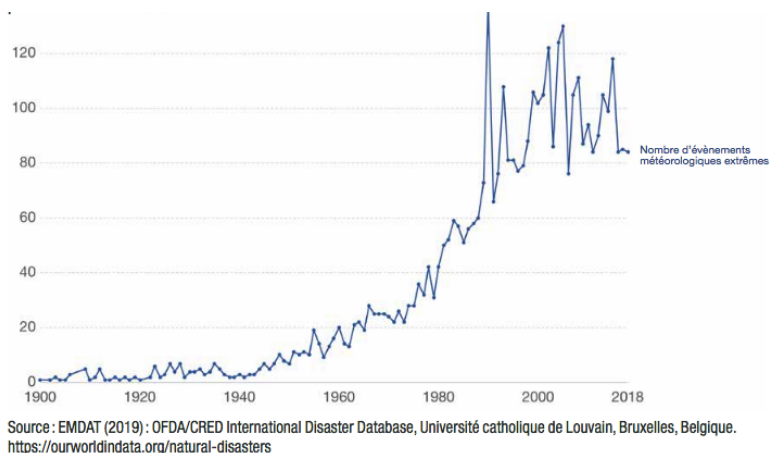
Les premières vagues de chaleur marines ont été étudiées en Méditerranée en 2003 (T° en été de 1 à 3°C au-dessus des moyennes saisonnières) puis en 2011 au large de la côte ouest de l'Australie (+ 5°C par rapport à la normale saisonnière pendant 10 semaines). De 2013 à 2015, le Pacifique Nord-Ouest a connu les plus fortes vagues de chaleur jamais enregistrées (+ 6,2°C).

Leurs causes et leur relation avec le réchauffement global sont mal définies mais leur fréquence a doublé depuis les années 1980 et leur intensité augmente.

- Évènements météorologiques extrêmes :

Avec l'augmentation des températures globales, l'eau des océans s'évapore en plus grande quantité dans l'atmosphère (7 % par degré) impactant le cycle de l'eau. Les masses d'air, très réactives, entraînent des évènements météo extrêmes : ouragans, pluies torrentielles, canicules...

Même si cela diffère selon le type d'évènement (nombre et intensité des canicules et précipitations ont augmenté mais pas le nombre de cyclones), leur augmentation illustre les modifications de la régulation climatique.



Une augmentation importante des évènements météorologiques extrêmes

A noter que l'augmentation de la vapeur d'eau (gaz à effet de serre) entraîne une amplification du phénomène de réchauffement (rétroaction positive).

→ Les pompes océaniques du CO₂

Le carbone se répartit sur Terre avec des échanges entre les quatre grands réservoirs naturels: atmosphère, lithosphère (sols et sous-sols), hydrosphère et biosphère (organismes vivants). Les échanges se font selon un cycle (émission et stockage de carbone) dont les variations ont un effet sur le climat.

L'océan absorbe plus de carbone qu'il n'en rejette : c'est un « puits » de carbone. Au contact de l'eau, le CO₂ atmosphérique se dissout et est pris en charge par deux « pompes à carbone » océaniques :

-la « pompe biologique »: les êtres vivants marins utilisent le carbone présent dans l'eau de mer pour leur développement : carbone pour la matière organique ou Carbone pour leur squelette ou coquille en carbonate de calcium (CaCO₃) ou aragonite.

A leur mort, ce carbone est soit à nouveau dissout, soit stocké dans les fonds marins (ce qui s'illustre, à l'échelle des temps géologiques, par l'existence du charbon, pétrole, gaz naturel, hydrates de méthane et roches calcaires (sédimentation carbonatée).

Issues de l'accumulation au fond des océans des plaques calcaires recouvrant les coccolithophorides, algues unicellulaires microscopiques. Elles se retrouvent en surface continentale suite à des mouvements géologiques.

Falaises de craies

CC SA 1.0 by Matthieu Debailleul



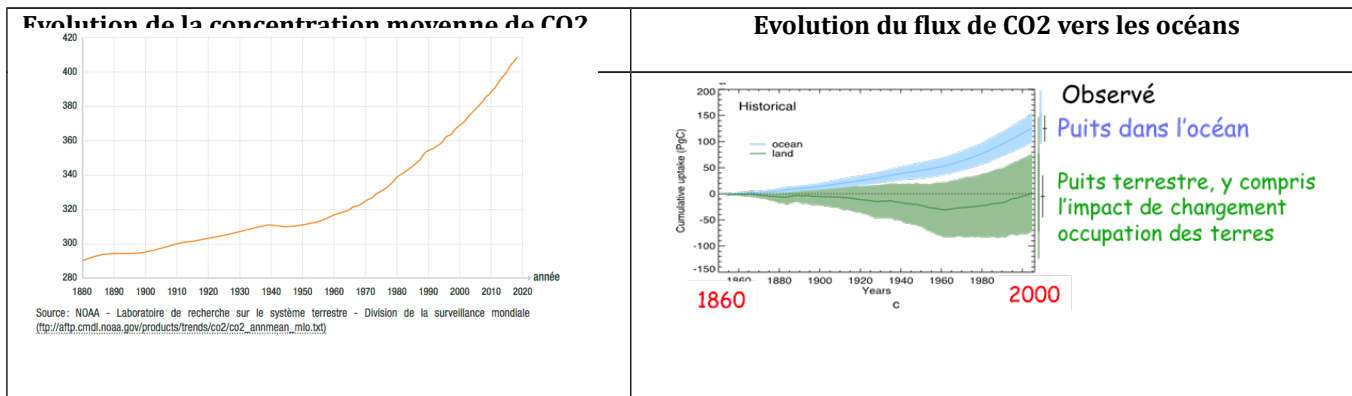
- la « pompe physique »: aux pôles, la faible température augmente la dissolution du CO₂ atmosphérique. La plongée des eaux entraîne ensuite le carbone dissout vers le fond.

Cette pompe réagit lentement aux perturbations climatiques : le dioxyde de carbone n'est restitué en partie à l'atmosphère lorsque les eaux profondes refont surface.

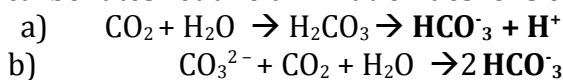
→ CO₂ et acidification des océans liée à l'activité humaine

En lien avec l'utilisation de combustibles fossiles et l'activité industrielle (la production de ciment...), la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère a augmenté, entraînant en parallèle une

augmentation du flux de CO₂ vers les océans : 25 % des 40 milliards de tonnes de CO₂ produits chaque année par l'activité humaine est absorbée par les océans (50% par l'atmosphère et le reste par la biosphère).



L'absorption de CO₂ par les océans entraîne une modification des équilibres chimiques des eaux marines : le sens des réactions (réversibles) se déplacent vers une formation augmentée d'ions hydrogène et d'ions bicarbonates* et une diminution des ions carbonates :

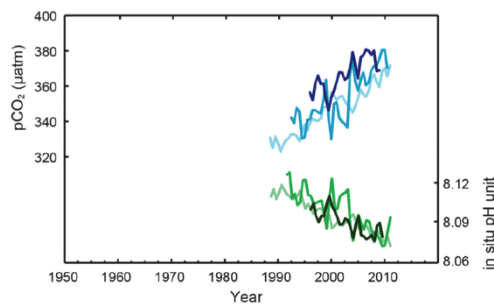


- a) Dioxyde de carbone CO₂ + eau H₂O → acide carbonique (H₂CO₃) → ion hydrogène (H⁺) + ion bicarbonate (HCO₃⁻).
 b) Ions carbonates CO₃²⁻ + Dioxyde de carbone CO₂ + eau H₂O → 2 ions bicarbonate (HCO₃⁻)

* Préfixe « bi » lié au double caractère de CO₃²⁻ : à la fois acide et base, il appartient à 2 couples acido-basiques différents.

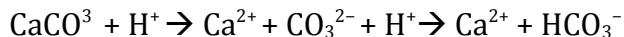
La concentration dans l'eau en ions hydrogène (H⁺) augmente : l'océan devient plus acide, on parle d'*acidification* (même si l'océan reste basique). Depuis la révolution industrielle, le pH diminue. Il est aujourd'hui de 8,05.

Variations de la concentration atmosphérique en CO₂ (en bleu) et du pH océanique (en vert) depuis 1990. Le pH diminue avec l'augmentation du CO₂ atmosphérique. DR



→ Conséquences de l'acidification des océans

Avec la modification chimique des océans, les organismes aux coquilles ou squelette calcaire disposent de moins d'ions carbonates pour former du calcaire et présentent des anomalies. De plus, en présence des ions H⁺, leurs molécules de calcaire peuvent se dissoudre:



Carbonate de calcium CaCO₃ + ion Hydrogène H⁺ → Calcium Ca²⁺ + ion carbonate CO₃²⁻ + ion Hydrogène H⁺ → Calcium Ca²⁺ + ion bicarbonate (HCO₃⁻)

La pompe biologique de carbone, reposant sur la bonne santé des écosystèmes, notamment planctoniques, peut rapidement se déséquilibrer : le stockage de carbone et donc l'absorption de CO₂ dans l'océan pourraient devenir moins efficaces.

L'acidification est un changement majeur en cours qui peut avoir des répercussions importantes sur la répartition et l'abondance de la faune et de la flore marines et amplifier le réchauffement par rétroaction.

En parallèle, le réchauffement des eaux de surface réduit aussi la capacité de l'océan à absorber du CO₂.

Les modèles numériques couplant système climatique et cycle du carbone mettent en évidence que la diminution du puits océanique augmente la quantité de CO₂ dans l'atmosphère avec une rétroaction positive sur le phénomène d'augmentation de T° et le changement climatique.

ANNEXES

A- Variations de la température de surface entre 1950 et 2020 (écarts de T° à la moyenne, en °C)

Annual D-N 2020

L-OTI(°C) Anomaly vs 1950-2020

0.75

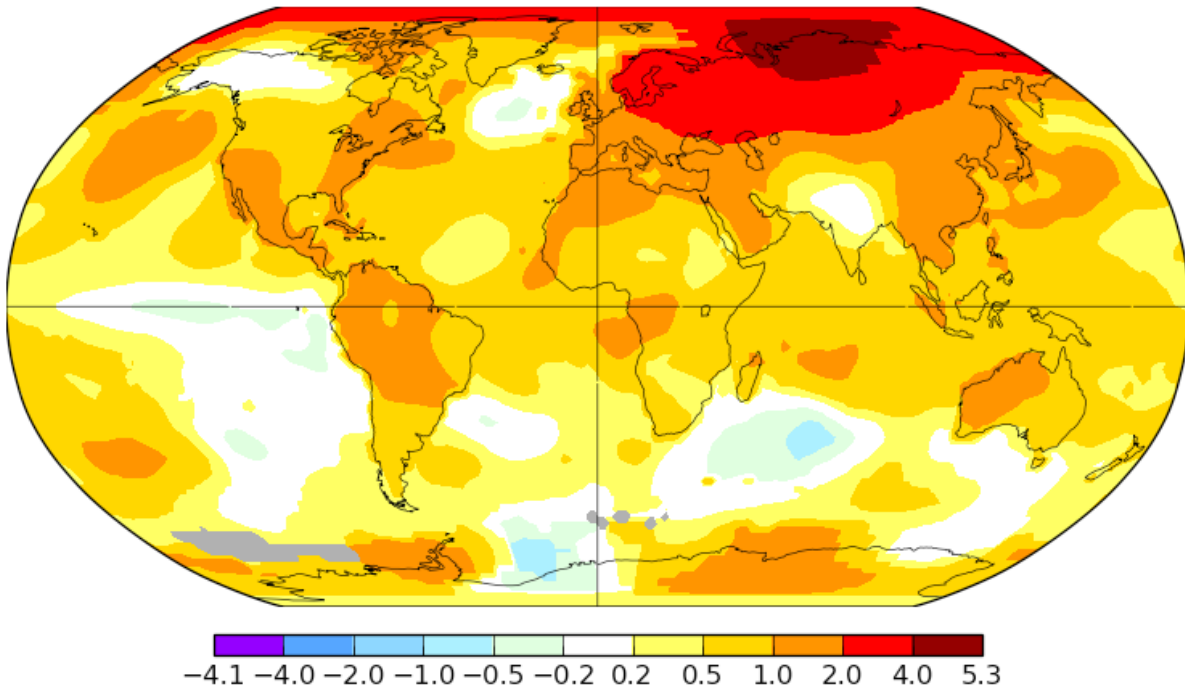
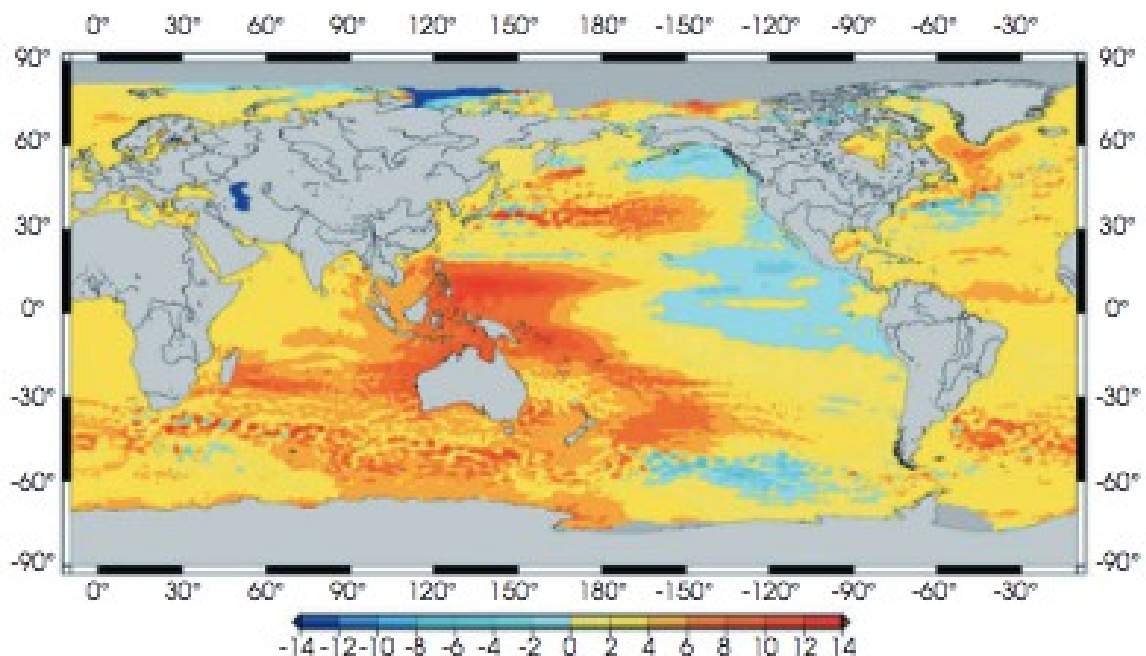


Image : GISTEMP Team, 2021: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. Dataset accessed 2021-02-26 at data.giss.nasa.gov/gistemp/

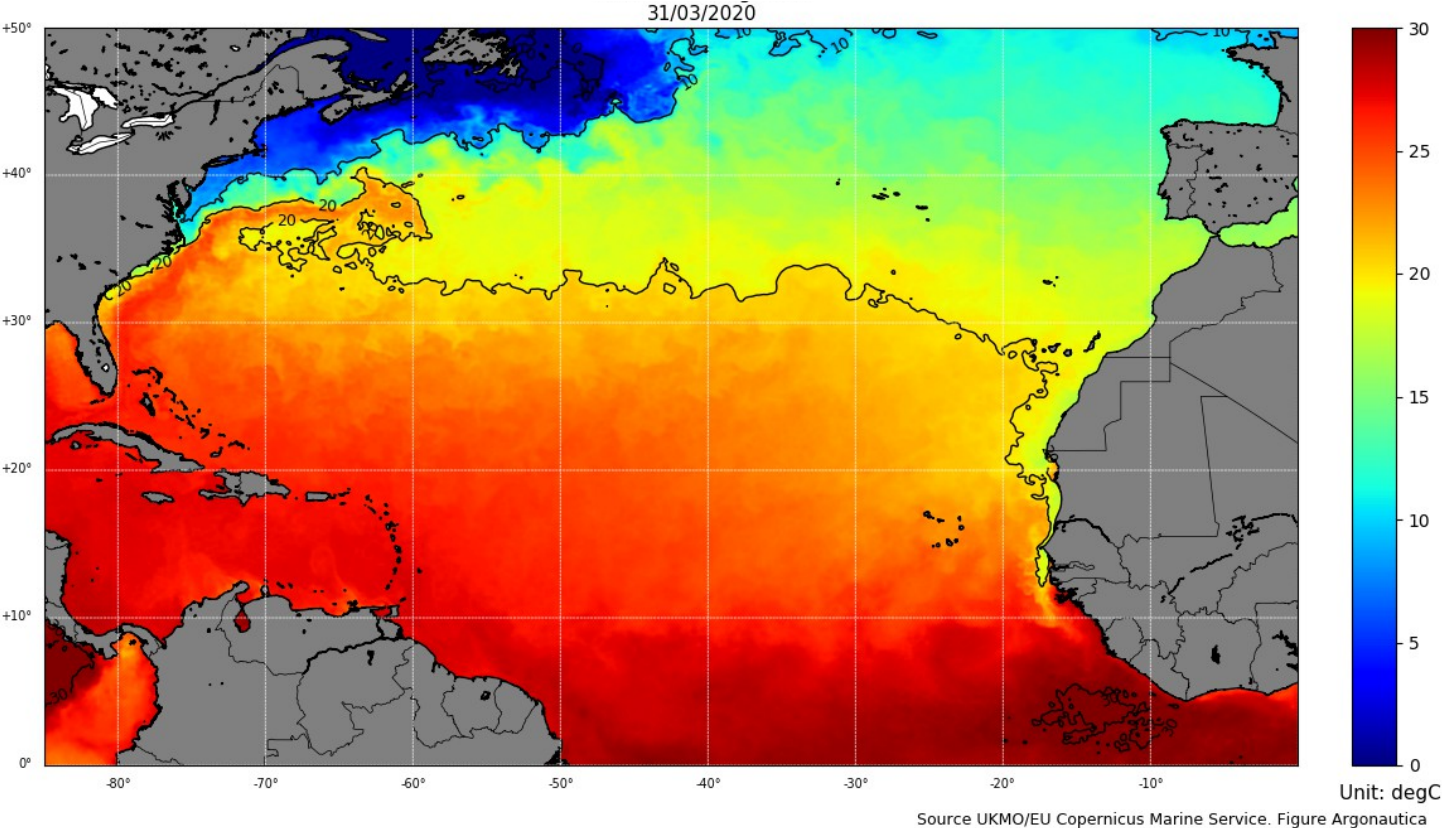
B- Carte des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2013) (d'après des mesures altimétriques) (source : LEGOS).

Mesures altimétriques des vitesses de variation
du niveau de l'océan (10/1992 - 08/2013, LEGOS/CLS)



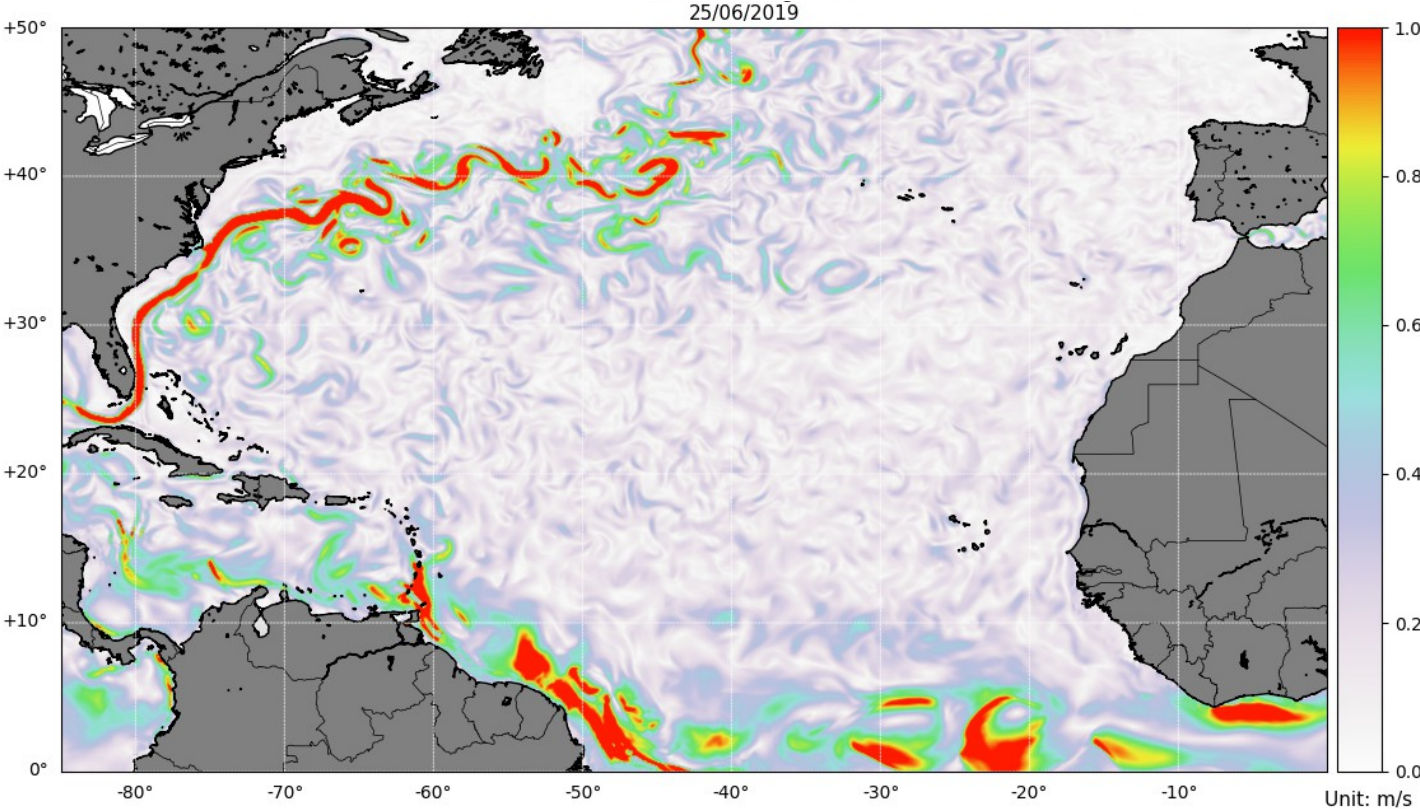
C- Le GULF STREAM, un courant observable par les satellites

Carte satellite des températures



Source UKMO/EU Copernicus Marine Service. Figure Argonautica

Carte satellite de la vitesse des courants marins

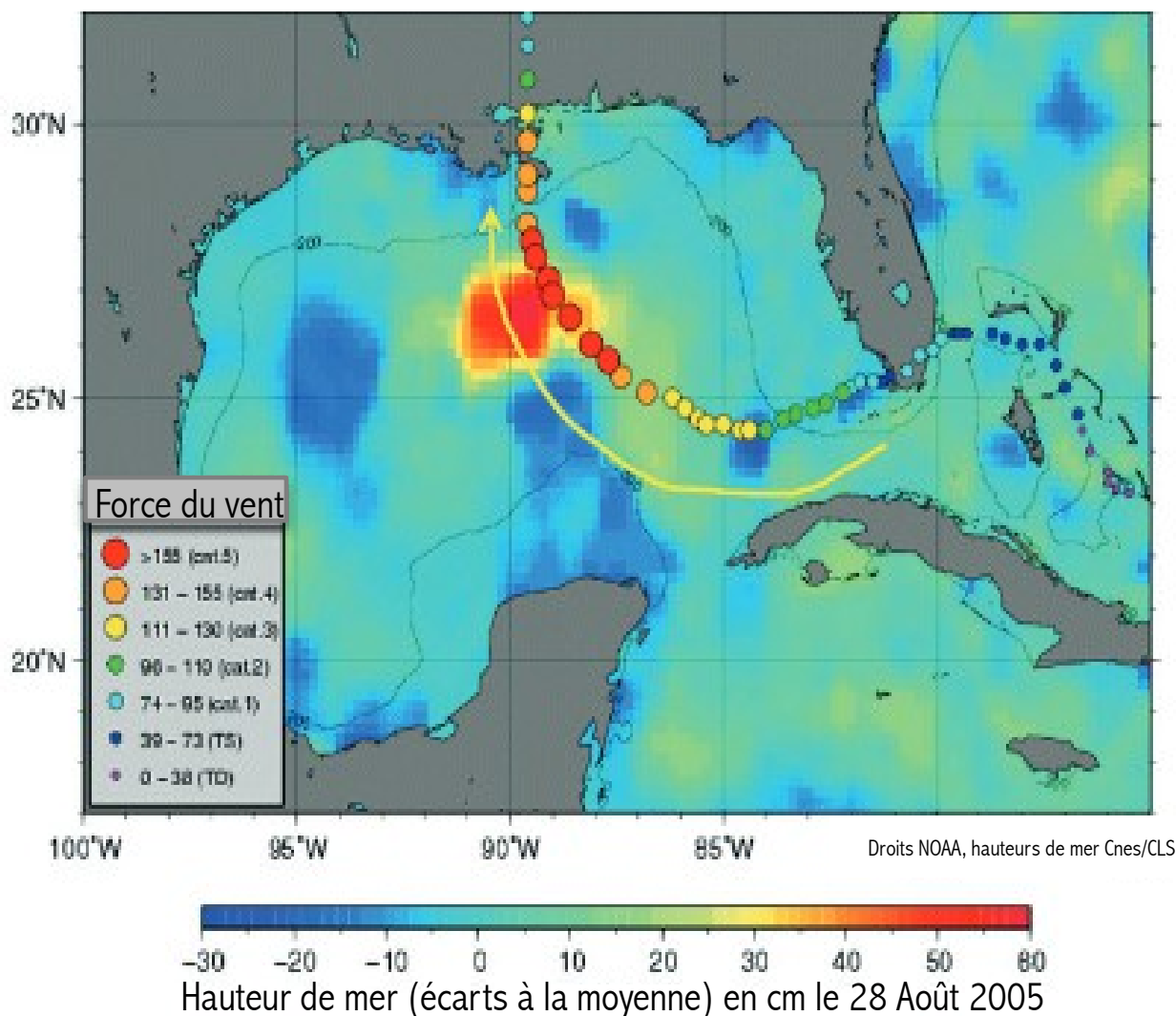


Source Mercator/EU Copernicus Marine Service. Figure Argonautica

D- Trajet du cyclone Katrina

Trajet avec force des vents, superposé à la carte des différences de hauteurs du niveau marin par rapport au niveau moyen. Les écarts à la moyenne du niveau marin révèlent l'existence de zones (tourbillons) en creux et de zones en bosses.

Trajet de l'ouragan Katrina dans le golfe du Mexique en 2005



QUELQUES LIENS A CONSULTER:

- European Space Agency (ESA), Climate Office : <https://climate.esa.int/en/educate>
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) : <http://atmosphere.copernicus.eu>
- Projet éducatif CNES Argonautica : <https://enseignants-mediateurs.cnes.fr/fr/enseignants-et-mediateurs/projets/argonautica>
- Intergovernmental Panel on Climate Change : <https://www.ipcc.ch/about/>
- Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer : <https://wwz.ifremer.fr/>
- Le climat entre nos mains "océan et cryosphère" (OCE) : <https://www.oce.global/sites/default/files/2020-06/Ocean-et-cryosphere-FR-WEB.pdf>
- Global Cryosphere Watch (world meteorological organisation) : http://globalcryospherewatch.org/state_of_cryo/seaice/
- Plateforme Océan & Climat : <https://ocean-climate.org/>
- L'océan, ma planète... Et moi ! : <https://www.fondation-lamap.org/fr/ocean/enseignants>
- Institute of Marine Engineering, Science and Technology: <https://www.imarest.org/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration : <https://www.noaa.gov/>, National Centers for Environmental Information: <https://www.ncei.noaa.gov>