

Secondaire
14-16



Dossier pédagogique

**POMPES À CHALEUR
PLANÉTAIRES**

Guide de l'enseignant
et fiches d'activités pour les élèves



POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES : Vue d'ensemble.....	4
En résumé.....	4
Brève description.....	4
Objectifs d'apprentissage.....	4
Résumé des activités.....	6
Notes pratiques pour les professeurs.....	7
Santé et sécurité.....	7
L'application web « Climate from Space ».....	8
Océans et climat : informations générales.....	9
Océans et climat.....	9
Courants océaniques.....	9
Observations satellites au-dessus de l'océan.....	10
Activité n° 1 : LES POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES.....	12
Activité n° 2 : MONTEE ET DESCENTE DES EAUX.....	15
Activité n° 3 : LE GULF STREAM.....	18
Fiche d'activité n° 1 : POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES.....	21
Fiche d'activité n° 2 : montée et descente des eaux.....	22
Fiche d'activité n° 3 : LE GULF STREAM.....	25
Fiche d'information n° 1 : POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES.....	27
Fiche d'information N° 2 : TEMPÉRATURE ET PROFONDEUR DE L'OCÉAN.....	31
Liens.....	32
Informations supplémentaires.....	32

Dossier Pédagogique de l'Initiative sur le Changement Climatique (CCI) -
POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES

<https://climate.esa.int/fr/educate/>

Concepts d'activité développés par l'Université de Twente (NL) et le
Centre national d'observation de la Terre (UK).

Le Bureau du climat de l'ESA accueille les réactions et les commentaires

<https://climate.esa.int/fr/helpdesk/>

Produit par le bureau climatique de l'ESA

Copyright © Agence Spatiale Européenne 2020-2021

POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES : Vue d'ensemble

En résumé

Sujet(s) : Géographie, Science, Science de la Terre

Tranche d'âge : 14-16 ans

Type : lecture, enquête mathématique, recherche en ligne

Complexité : moyenne à avancée

Durée minimale de la leçon : 4 heures

Coût : faible (5-20 euros)

Lieu : en intérieur

Comprend l'utilisation de : Internet, calculatrice, tableur, glace et eau colorée.

Mots clés : capacité thermique, densité, circulation thermohaline, salinité, température de surface des eaux, satellite, observation de la Terre, stratification, Gulf Stream.

Brève description

Dans cette série d'activités, les élèves apprendront comment la circulation océanique a un impact sur le climat.

Dans l'activité d'introduction, ils effectuent des calculs pour comparer l'impact relatif du réchauffement climatique sur l'atmosphère et les océans.

Une activité pratique, utilisant du matériel que l'on peut se procurer facilement, permet aux élèves de voir comment de l'eau de différentes températures, peut former des couches dans l'océan. Ainsi ils peuvent alors envisager comment utiliser cette propriété pour étudier l'effet des changements de salinité de l'eau.

Dans la dernière activité, les élèves utilisent l'application web « Climate from Space » pour en savoir plus sur le Gulf Stream.

Objectifs d'apprentissage

Travailler sur ces activités apportera aux élèves les capacités suivantes :

Effectuer des calculs pour comparer le rôle des océans et de l'atmosphère dans la régulation du climat.

Expliquer comment naît la circulation thermohaline mondiale.

Décrire comment les courants océaniques transportent l'eau et l'énergie, tout autour de la Terre.

Utiliser un modèle pour examiner le mouvement des eaux de différentes températures, et expliquer la stratification dans l'océan.

Concevoir des méthodes pratiques pour étudier la circulation de l'eau à travers les océans.

Décrire le comportement du Gulf Stream à l'aide d'informations provenant de données climatiques.

Synthétiser les enregistrements d'au moins deux variables climatiques essentielles, afin d'exposer une corrélation ou une tendance que vous avez observée.

Résumé des activités

	Titre	Description	Résultat	Notions pré-requises	Durée
1	Pompes à chaleur planétaires	Lecture et calculs	Effectuer des calculs pour comparer le rôle des océans et de l'atmosphère dans la régulation du climat. Expliquer comment naît la circulation thermohaline mondiale. Décrire comment les courants océaniques transportent l'eau et l'énergie, tout autour de la Terre.	Calculs à l'aide du formulaire standard ; surface d'une sphère ; mise en forme d'équations.	1 heure
2	Eau montante et eau descendante	Activité pratique	Utiliser un modèle pour examiner le mouvement des eaux de différentes températures, et expliquer la stratification dans l'océan. Concevoir des méthodes pratiques pour étudier la circulation de l'eau à travers les océans.	Aucun	1½ heures
3	Le Gulf Stream	Recherche	Décrire le comportement du Gulf Stream à l'aide d'informations provenant de données climatiques. Synthétiser les enregistrements d'au moins deux variables climatiques essentielles, afin d'exposer une corrélation ou une tendance que vous avez observée.	Lecture d'une partie de l'activité n° 1	1½ heures

Les temps indiqués dans le tableau récapitulatif sont pour les exercices principaux, ils supposent un accès complet à l'informatique, et/ou une distribution des calculs répétitifs et des graphiques à la classe. Ils comprennent le temps nécessaire à la mise en commun des résultats, mais pas la présentation des résultats. Cette étape pourra en effet varier en fonction de l'effectif de la classe et des groupes. Enfin, d'autres approches peuvent prendre plus de temps.

Notes pratiques pour les professeurs

En début de section, le **matériel requis pour** chaque activité est indiqué, ainsi que des notes sur les éventuelles préparations nécessaires, en plus des photocopies des fiches d'activités et des fiches d'information.

Les **fiches d'activités** sont à usage unique et peuvent être photocopiées en noir et blanc.

Les **fiches d'informations** peuvent contenir : des images plus grandes afin de pouvoir les insérer dans des présentations en classe, des informations supplémentaires pour les élèves, ou des données avec lesquelles ils pourront travailler. Ces documents sont réutilisables, il est donc préférable de les imprimer ou de les copier en couleur.

Les **feuilles de calculs, tableaux de données ou documents supplémentaires** nécessaires à l'activité peuvent être téléchargés sur le lien suivant :

<https://climate.esa.int/fr/education/climat-pour-les-ecoles/>.

Des idées **pour aller plus loin** et des suggestions de **variation** sont incluses dans la description de chaque activité.

Pour les activités pratiques, les réponses aux feuilles d'activités et les résultats des exemples sont inclus afin d'aider à l'**évaluation**. Des critères pour aider le professeur à évaluer les compétences essentielles, telles que la communication ou le traitement des données, sont indiquées dans la partie correspondante de la description de l'activité.

Santé et sécurité

Dans toutes les activités, nous avons supposé que les consignes de sécurité habituelles continueront d'être suivies, concernant l'utilisation des équipements de base (les appareils électriques comme les ordinateurs), les mouvements dans la salle de classe, les déplacements et les renversements, les premiers secours, etc... Comme la nécessité de ces procédures est universelle mais que les détails de leur mise en œuvre varient considérablement, nous ne les avons pas détaillées à chaque fois. Au lieu de cela, nous avons mis en évidence les dangers propres à une activité pratique donnée, afin d'éclairer l'évaluation des risques.

Certaines de ces activités utilisent l'application web « Climate from Space » ou d'autres sites web interactifs. Il est possible de naviguer à partir de ces sites vers d'autres parties du site Web de l'ESA « Climate Change Initiative » ou de l'organisation hôte, puis vers des sites Web externes. Si on ne peut pas - ou on ne souhaite pas - limiter les pages que les élèves peuvent consulter, on pourra leur rappeler les règles de sécurité de l'établissement sur Internet.

L'application web « Climate from Space »

Les satellites de l'ESA jouent un rôle important dans la surveillance du changement climatique. L'application web « Climate from Space » (cfs.climate.esa.int) est une ressource en ligne qui utilise des articles ou « stories » illustrées pour résumer certaines des façons dont notre planète change et mettre en évidence le travail des scientifiques de l'ESA.

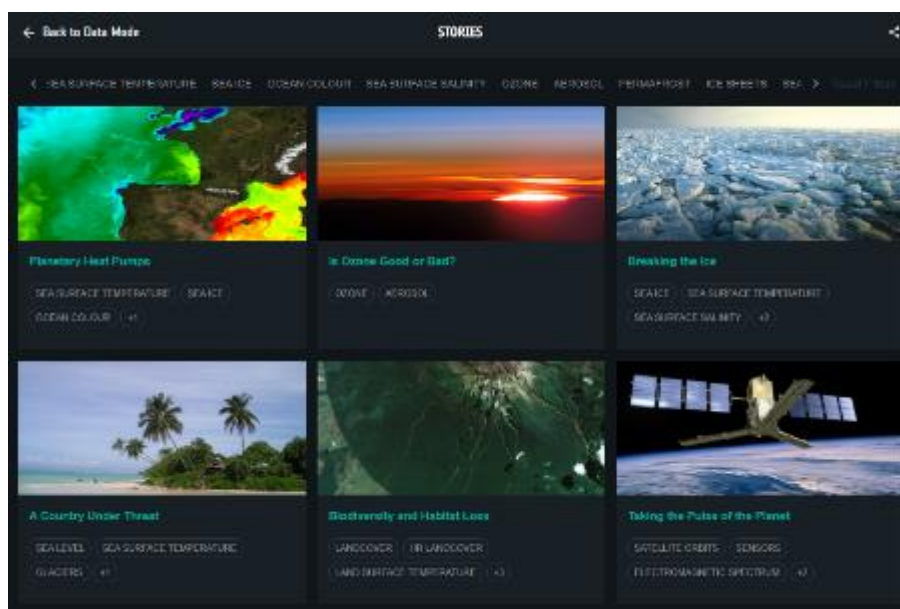


Figure n° 1: Articles ou « Stories » de l'application web Climate from Space (Source : ESA CCI)

Le programme « Climate Change Initiative » de l'ESA produit des enregistrements mondiaux fiables de certains aspects clés du climat, appelés variables climatiques essentielles (VCE). L'application web Climate from Space vous permet d'en savoir plus sur les impacts du changement climatique en observant ces données par vous-même.

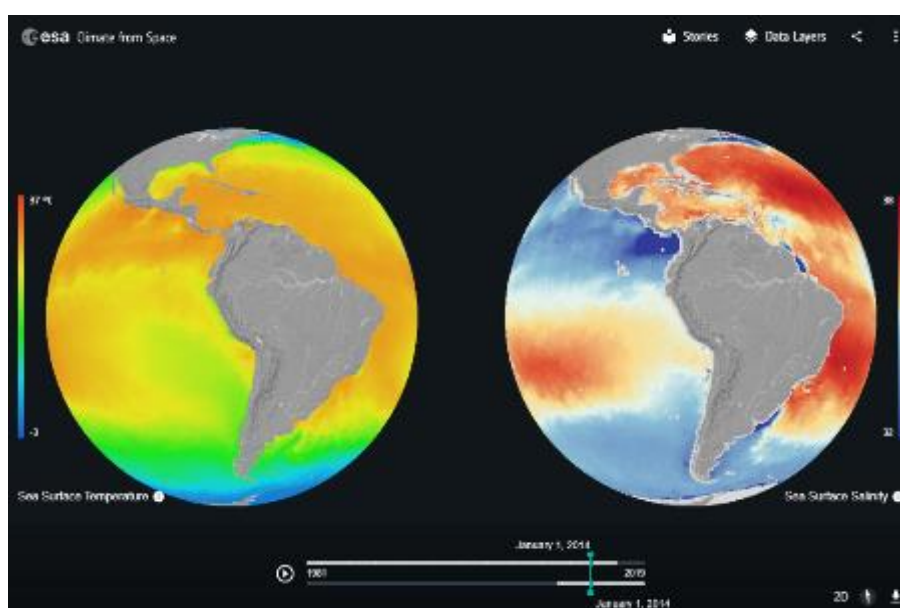


Figure n° 2: Comparaison de la température de surface des eaux et de la salinité dans l'application web Climate from Space (Source : ESA CCI)

Océans et climat : informations générales

Océans et climat

La répartition de la chaleur autour de la Terre, est l'une des raisons principales pour lesquelles la météo peut être compliquée et difficile à prévoir. L'énergie en provenance de la lumière du soleil, et absorbée par l'atmosphère, se déplace entre des régions aux températures différentes. Ce déplacement est fonction du rayonnement de la surface de la Terre lorsque l'eau s'évapore, mais aussi de la circulation de l'atmosphère et des courants océaniques. Alors que nous nous attendions à ce que la direction principale de ce mouvement de chaleur, soit de l'équateur chaud vers les pôles froids, nous constatons que la rotation de la Terre, et la friction entre l'océan et les couches de l'atmosphère, ajoutent une composante est-ouest. Ce n'est là, que le premier des nombreux facteurs de complication.

La plupart d'entre nous, passent la majeure partie de leur vie, sur les terres qui couvrent moins d'un tiers de la surface de notre planète. La météo qui peut influencer nos activités quotidiennes, est principalement affectée par les mouvements de l'atmosphère. Par conséquent, nous ne pensons pas souvent au rôle que jouent les océans dans l'influence des modèles météorologiques, et sur une plus longue échelle de temps, dans le contrôle du climat.

Les régions de la Terre situées à la même distance de l'équateur, reçoivent la même quantité de rayonnement solaire au cours d'une année : on pourrait donc s'attendre à ce qu'elles aient des climats similaires. Un coup d'œil aux schémas de peuplement montre les conséquences d'une telle situation : de nombreuses villes européennes se situent dans la bande entre 49 et 52 degrés nord. Pourtant, les grandes villes de la côte EST de l'Amérique du Nord sont beaucoup plus au SUD. Enfin, si le climat d'endroits aussi septentrionaux que la côte norvégienne est doux, par rapport à des endroits situés à des latitudes similaires en Amérique ou au centre de la masse continentale asiatique, c'est en partie grâce au courant majeur qu'est le Gulf Stream. L'énergie que ce courant transporte des latitudes tropicales vers l'Atlantique occidental, est transférée de l'eau à l'air au-dessus d'elle, et transportée vers la terre par les vents côtiers.

Courants océaniques

Le système du Gulf Stream, que les élèves peuvent étudier dans l'activité n° 3, est l'un des nombreux systèmes de courants ou gyres, qui résultent des vents de surface, et qui entraînent la couche supérieure de l'océan, de la même manière qu'une brise ébouriffe la surface d'une flaque d'eau. Le tourbillon subtropical entraîné par les alizés, dans le Pacifique, en est un autre. La perturbation de ce schéma de circulation, entraîne les événements El Niño ou La Niña, qui sont étudiés dans le dossier pédagogique complémentaire « *Prendre le pouls de la planète (14-16 ans)* », disponible sur <https://climate.esa.int/educate/climate-for-schools/>.

Quiconque a déjà nagé dans la mer, connaît les effets des courants de circulation plus locaux, résultant des mouvements des marées, ou de la géographie de la côte et des fonds marins. Un nageur peut ressentir les changements de température et la

direction dans laquelle l'océan le tire. Il peut également être conscient de la puissance d'un courant de fond - l'eau sous la surface se déplaçant alors dans une direction différente. À plus grande échelle, l'eau voyage autour du monde entier, selon un schéma de circulation tridimensionnel, et sur une période d'environ mille ans. Ce que l'on appelle le Grand Convoyeur Océanique (illustré à la figure n° 3 page suivante), est également connu sous le nom de circulation thermohaline globale, car il est alimenté par des différences de température et de salinité. Par exemple, la formation de la banquise dans l'Arctique, laisse derrière elle de l'eau plus salée qui, étant plus dense, s'enfonce dans les profondeurs. L'eau de surface, attirée vers la glace, se refroidit et coule à son tour, créant ainsi un courant froid profond qui s'éloigne de la glace, et un courant de surface plus chaud qui s'en rapproche. L'activité n° 2 montre - à une échelle beaucoup plus petite - comment les différences de densité peuvent conduire l'eau à se déplacer, dans différentes directions et à différentes profondeurs.

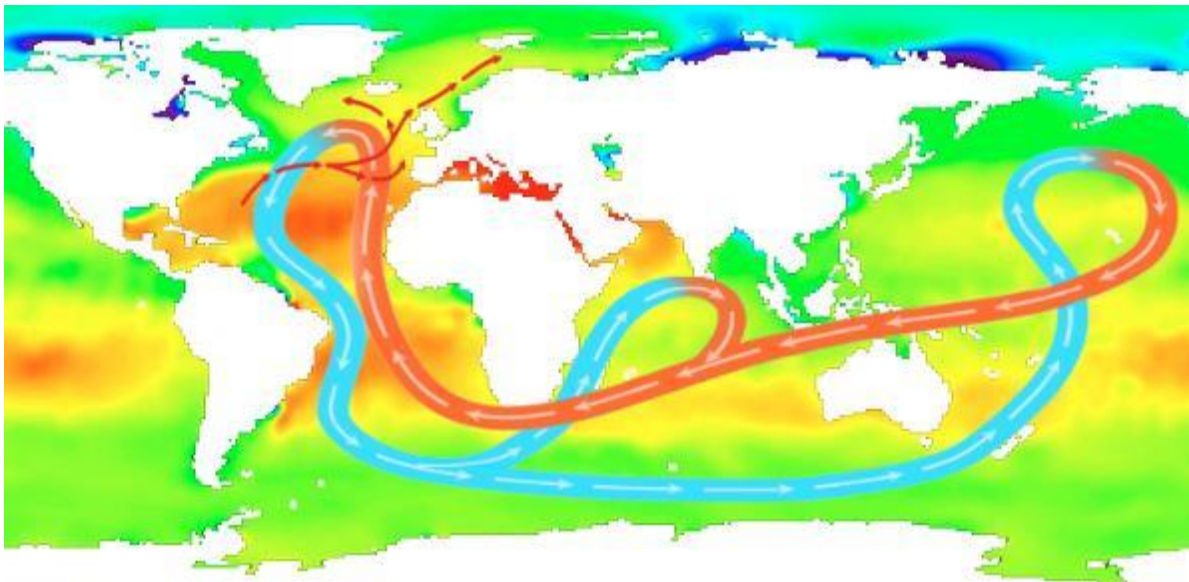


Figure n° 3 : Salinité moyenne (couleurs de fond : le rouge indique une salinité élevée, le vert une faible salinité) ; le Gulf Stream (flèches rouges) ; et la circulation thermohaline mondiale (large bande : les eaux de surface plus froides sont en bleu, les eaux de surface plus chaudes en rouge) (Source : ESA).

Observations satellites au-dessus de l'océan

Avant l'ère des satellites, la température de l'océan ne pouvait être mesurée qu'à l'aide de thermomètres reliés au rivage, descendus de navires, ou fixés à des bouées ou des submersibles. Cela signifiait, bien sûr, que les mesures étaient inégales et qu'il n'existait des données continues que pour très peu d'endroits.

Les caméras thermiques embarquées sur les satellites, peuvent détecter la température de surface des eaux, dans le monde entier et à intervalles réguliers. Un satellite en orbite géostationnaire, peut voir chaque zone d'eau dans un hémisphère particulier, une fois toutes les quinze minutes environ. Un satellite en orbite polaire, plus proche de la Terre, peut voir plus de détails et couvrir la planète entière, mais

ne mesurera la température à un endroit particulier, que tous les dix jours environ. (Le dossier pédagogique "*Prendre le pouls de la planète*" mentionné ci-dessus, comprend plus d'informations sur la manière dont les orbites des satellites affectent les données qu'ils collectent).

Activité n° 1 : LES POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES

Cette activité basée sur la lecture, conduit à des calculs utilisant la capacité thermique spécifique. L'équation correspondante est donnée, de sorte que les élèves n'ont pas besoin de connaissances préalables sur ce terme. L'une ou l'autre des parties de l'activité (la lecture et les calculs), ou les deux, peuvent être considérées comme des devoirs à la maison, en fonction des capacités de la classe.

Matériel

- Fiche d'information n° 1 (2 pages)
- Fiche d'activité n° 1
- Calculatrice
- Application web Climate from Space : article *Planetary Heat Pumps* (facultatif)

Exercice

1. Demander aux élèves de lire la fiche d'information n° 1 et de travailler individuellement, ou en binôme, pour résumer le contenu sous la forme qu'ils jugeront la plus compréhensible. Il peut s'agir par exemple, d'une liste de points ou d'un schéma conceptuel.

Si ce travail est réalisé en classe, on pourra compléter le texte avec des éléments tirés de l'article *Planetary Heat Pumps* de Climate from Space, comme suit :

- La galerie de la diapositive n° 2, comprend une carte des températures de surface des eaux, qui peut susciter une discussion sur les causes des courants de surface. Elle propose aussi une coupe transversale de l'Atlantique, qui montre la distribution verticale de l'eau à différentes températures. Elle contient enfin une carte de la circulation thermohaline. (Utilisez le bouton flèche à l'extrême droite de l'écran pour faire défiler les différentes images de cette diapositive).
 - Le globe de la diapositive n° 3, montre les températures de surface des eaux dans le monde entier, à intervalles réguliers depuis 1981. (Passez d'une étape à l'autre, plutôt que de faire une lecture en continu).
 - La diapositive n° 4, comprend une vidéo donnant plus de détails sur les interactions entre l'atmosphère et l'océan, notamment une illustration de la réduction des températures dans le sillage d'un ouragan (de 0:22 à 0:36) et de la remontée des eaux (0:40-1:06).
 - La diapositive n° 6 donne des informations supplémentaires sur la variation de la salinité, et montre comment elle varie à travers le globe. Le texte explique le rôle de la salinité dans le fonctionnement de la pompe à chaleur planétaire du globe.
2. La fiche d'activité n° 1, guide les élèves dans le calcul de l'augmentation théorique de la température, compte tenu de la vitesse à laquelle l'excès de chaleur est ajouté au système terrestre. Demander aux élèves de faire le calcul, en les aidant si nécessaire.

3. La dernière question demande aux élèves d'utiliser les idées de la fiche d'information, pour expliquer pourquoi leurs calculs ne correspondent pas aux observations. Des chiffres largement cités, donnent une augmentation de la température globale d'environ 1°C depuis l'époque préindustrielle (plusieurs centaines de fois moins que le chiffre calculé) et de la température de surface des eaux de 0,13°C par décennie (environ dix fois plus que le résultat du calcul).

Discuter de ces réponses, pourrait amener à considérer la manière dont les modèles mathématiques utilisés en science, commencent souvent par de grandes approximations. Ils sont ensuite progressivement affinés, pour correspondre à la réalité. Dans ce cas, une deuxième approximation pour l'atmosphère, basée sur les données de la fiche d'information, consisterait à utiliser 10 % du chiffre de l'énergie annuelle.

Une deuxième approximation pour les océans, pourrait consister à trouver la surface des océans (70% de la réponse à la question 1), à calculer la masse d'une couche de 30 m de profondeur (la densité moyenne de l'eau de mer est de 1027 kg m⁻³), et à utiliser cette valeur pour calculer l'augmentation de température attendue. On pourra demander aux élèves les plus scientifiques, d'effectuer ce calcul.

Réponses de la fiche d'activité

1. En utilisant $A = 4\pi r^2$, la surface de la Terre = $5,15 \times 10^{14} \text{ m}^2$
2. Énergie excédentaire totale = $0,62 \text{ W m}^{-2} \times 5,15 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 3,19 \times 10^{14} \text{ J s}^{-1}$
 $= 3,19 \times 10^{14} \text{ J s}^{-1} \times (60 \times 60 \times 24 \times 365,25) = 1,01 \times 10^{22} \text{ J an}^{-1}$
3. En utilisant $\Delta T = Q \div mc$, l'augmentation de la température atmosphérique
 $= 1,01 \times 10^{22} \text{ J an}^{-1} \div (5,14 \times 10^{18} \text{ kg} \times 1158 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}) = 1,69\text{°C an}^{-1}$
4. Augmentation de la température océanique
 $= 1,01 \times 10^{22} \text{ J an}^{-1} \div (1,4 \times 10^{21} \text{ kg} \times 3850 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}) = 1,87 \times 10^{-3}\text{°C an}^{-1}$
5. L'atmosphère : parce que l'atmosphère a une masse beaucoup plus faible et que l'air a une capacité thermique spécifique plus faible.
6. Le chiffre réel pour l'atmosphère est plus faible, car selon l'article, 90 % de l'énergie excédentaire est absorbée par les océans. Une partie sera également absorbée par les terres, ce qui réduira encore la quantité disponible pour chauffer l'atmosphère et entraînera une augmentation plus faible de la température annuelle.

Le calcul pour les mers et les océans utilise la masse totale d'eau, mais l'énergie est absorbée à la surface et restera en grande partie dans les couches supérieures : l'eau est un mauvais conducteur de chaleur, et l'eau plus chaude flotte sur l'eau plus froide (au moins au-dessus de 4°C). Il faudra des siècles pour que la circulation thermohaline transporte cette énergie vers les profondeurs de l'océan. La masse utilisée dans le calcul est donc beaucoup trop importante, ce qui conduit à une augmentation annuelle de la température beaucoup trop faible.

Les valeurs principales de cet exercice concerne la période 2000-2012 et proviennent de Allan R., Liu C., Loeb N., Palmer M., Roberts M., Smith D., & Vidale

P. (2014) 'Changes in global net radiative imbalance 1985-2012', *Geophysical Research Letters* DOI : [10.1002/2014GL060962](https://doi.org/10.1002/2014GL060962).

Activité n° 2 : MONTEE ET DESCENTE DES EAUX

Dans cette activité pratique, les élèves reproduisent la thermodynamique des océans dans un récipient. Ils utilisent de l'eau colorée pour suivre les flux, et voient comment se forment et se maintiennent les couches d'eau à différentes températures. Ils sont invités à réfléchir à la manière dont ils peuvent utiliser ce modèle, pour démontrer d'autres aspects de la circulation océanique.

Matériel

- Un grand récipient transparent par groupe - il peut s'agir d'un grand béccher ou d'un vase, ou d'une bouteille en plastique de deux litres dont la partie supérieure a été coupée,
- Un petit récipient par groupe - il doit avoir une base assez large et être suffisamment petit pour être immergé dans le grand récipient (un pot à épices par exemple),
- Des sacs en plastique,
- Des élastiques ou de la ficelle,
- Du colorant alimentaire ou de l'encre,
- De la glace dans un seau pour le refroidissement, ou de l'eau bien froide,
- Pouvoir accéder à l'eau chaude et à l'eau froide,
- Un chronomètre ou une horloge par groupe (facultatif),
- Un appareil photo ou un smartphone par groupe (facultatif),
- Des thermomètres (facultatif),
- Des chiffons ou des serviettes en papier,
- La fiche d'activité n° 2 (2 pages),
- Du matériel pour créer des affiches, ou un logiciel pour créer des vidéos ou des présentations (voir étape 3),
- Application web Climate From Space : article *Planetary heat pumps* (facultatif).

Santé et sécurité

Utiliser de l'eau chaude entre 40°C et 60°C - si on ne dispose pas d'eau chaude courante, mélanger l'eau bouillante d'une bouilloire avec de l'eau froide.

Les colorants alimentaires et l'encre tachent, on conseillera donc aux élèves de travailler avec précaution pour éviter les renversements et les éclaboussures.

S'assurer que tous les éléments utilisés par l'activité, sont placés sur des surfaces stables, éloignés des bords de la table.

S'assurer qu'il y a du matériel disponible pour intervenir en cas de renversements.

Exercice

1. Introduire l'activité avec le diagramme d'une coupe transversale de l'Atlantique Nord, montrant comment la température varie en surface et en profondeur. Cette image se trouve sur l'application web Climate From Space, article *Planetary heat pumps*, dans la galerie de la diapositive n° 2. Elle est également

disponible sur la fiche d'information n° 2. On pourra expliquer que dans cette activité, les élèves vont explorer comment se crée la stratification ou la superposition de couches illustrée dans ce diagramme.

2. Les élèves peuvent ensuite poursuivre leurs recherches en suivant les instructions de la fiche d'activité n° 2.1, en travaillant en binômes ou en groupes. Si on dispose de peu de temps, on pourra répartir les combinaisons proposées dans la classe, en demandant à chaque binôme ou groupe de ne faire qu'une ou deux séries d'observations.

Si on dispose de plus de temps et de thermomètres, on demandera alors aux élèves d'étudier comment le processus change avec la différence de température. Quelle est la plus petite différence de température qui entraîne une circulation ? Quelle est celle qui entraîne une stratification ?

3. Demander aux élèves de suivre les conseils de la fiche d'activité n° 2.2, afin d'analyser et présenter leurs résultats, d'une manière adaptée à la méthode qu'ils auront utilisée pour enregistrer leurs observations. On pourra introduire des exigences ou des contraintes supplémentaires, pour permettre d'évaluer des compétences particulières, ou d'élever la difficulté.

Encourager les élèves à utiliser des hypothèses sur la variation de la densité en fonction de la température, pour expliquer leurs observations et les relier à ce qu'ils ont appris dans l'activité précédente.

4. Les élèves peuvent partager leurs résultats avec un autre groupe, en recherchant les similitudes et les différences, et en évaluant entre eux les explications proposées.
5. Les tâches de conception proposées à la fin de la fiche d'activité n° 2.2, invitent les élèves à adapter leur méthodologie, afin d'étudier comment la salinité affecte le mouvement de l'eau, tout en démontrant la remontée des eaux. Les élèves peuvent en discuter en groupe ou faire l'une de ces tâches en devoir à la maison.

S'ils ont assez de temps, ils peuvent ensuite mettre en œuvre leur méthodologie.

Résultats de l'échantillon

Eau froide dans un grand récipient, eau chaude dans un petit récipient



Figure n° 4 : Résultats pour un grand récipient d'eau froide, un petit récipient d'eau chaude (Source : ESA CCI)

L'eau chaude, moins dense, s'écoule rapidement vers le haut en formant des tourbillons comme des volutes de fumée. L'eau colorée se répand vers l'extérieur, formant une couche flottante d'eau plus chaude à la surface (voir figure n° 4).

Eau chaude dans un grand récipient, eau froide dans un petit récipient

L'eau froide, plus dense, reste dans le récipient. Si l'on donne un petit coup de coude au grand récipient, l'eau de surface se déplace et une partie peut se déverser. Cependant, elle reste sous forme de bulle, flottant dans l'eau plus chaude comme si elle était en apesanteur (voir figure n° 5).



Figure n° 5 : Résultats pour un grand récipient d'eau chaude, un petit récipient d'eau froide (Source : ESA CCI)

Eau chaude dans un grand récipient, eau froide dans un petit récipient horizontal



Figure n° 6 : Résultats pour un grand récipient d'eau chaude, un petit récipient d'eau froide horizontal (Source : ESA CCI)

L'eau s'écoule du petit récipient et, étant plus dense, reste au fond du grand récipient, en formant une couche à la base (voir figure n° 6).

Eau chaude dans un grand récipient, eau froide introduite par le haut.

L'eau froide plus dense va couler au fond, créant des tourbillons et des schémas d'écoulement similaires à ceux observés dans la première expérience (voir figure n° 7).



Figure n° 7 : Introduction d'eau froide au sommet d'un grand récipient d'eau chaude (Source : ESA CCI)

Activité n° 3 : LE GULF STREAM

Dans cette activité, les élèves utilisent l'application web *Climate From Space*, pour observer les températures de surface des eaux le long de la trajectoire du Gulf Stream, et les données téléchargées. Tout cela afin de comparer les modèles et les tendances dans le Gulf Stream avec ceux observés ailleurs dans l'Atlantique Nord. Ils recherchent et expliquent ensuite, les liens entre la température de surface des eaux et une autre variable climatique, en utilisant les connaissances acquises lors de l'étude du sujet.

Matériel

- Accès à Internet,
- Application web Climate From Space,
- Fiche d'activité n° 3 (2 pages),
- Feuille de calcul *Pompes à chaleur planétaires* de l'activité n° 3,
- Tableur ou papier millimétré (de préférence).

Préparation

Télécharger la feuille de calcul « Pompes à chaleur planétaires » de l'activité n° 3 de la section « Pompes à chaleur planétaires » de la page Web Climat pour les écoles de l'ESA (<https://climate.esa.int/fr/educate/climate-for-schools/>) et la placer dans un espace où les élèves pourront y accéder sans avoir à se connecter, ou bien imprimer les données qu'elle contient afin que les élèves les tracent à la main.

Exercice

1. Demander aux élèves de préciser, sans utiliser de carte ou d'atlas, lequel est le plus au nord : Paris ou Montréal ? Amsterdam ou New York ? Vancouver ou Londres ? Oslo ou Calgary ? A chaque fois, c'est la ville européenne qui est le plus au nord. Généralement, les gens pensent le contraire parce que les villes nord-américaines ont un climat plus frais.
2. Rappeler aux élèves que l'Europe occidentale est réchauffée par le Gulf Stream (comme indiqué sur la fiche d'information n°1) et leur expliquer qu'ils vont en apprendre davantage à ce sujet dans cette leçon.
3. Demander aux élèves de commencer par explorer le Gulf Stream avec l'application web Climate From Space, en suivant les instructions de la fiche d'activité n° 3.1. Ils devraient ensuite utiliser les données de la feuille de calcul pour voir plus de détails, comme décrit dans la première partie de la fiche d'activité n° 3.2.

La liste de données est suffisamment limitée pour que les élèves puissent tracer la courbe à la main, mais dans ce cas ignorer la question n° 4, car il sera difficile d'identifier une ligne de tendance.

4. La section "Faire des relations" de la fiche d'activité, comprend plusieurs suggestions pour une recherche plus approfondie.

Les instructions demandent aux élèves de faire le lien entre la partie précédente du sujet, ce qu'ils découvrent, et ce qu'ils ont appris dans la première partie de l'activité. On peut donc leur demander de travailler individuellement, et de créer

un court rapport qui pourra être utilisé pour évaluer leur apprentissage.
On peut également demander aux binômes ou aux groupes, de réaliser une affiche, une présentation ou une vidéo, afin de partager ce qu'ils ont appris avec le reste de la classe.

Réponses de la fiche d'activité

1. Il existe une nette différence de température dans les premiers mois de l'année, lorsque les eaux chaudes du Gulf Stream se jettent dans les eaux plus froides du nord. En avançant dans l'année, la différence devient moins prononcée, en commençant par l'extrémité orientale. Le Gulf Stream est bien défini, avec des bords nets, le long de la première partie de son parcours. Là où il se mélange aux eaux froides provenant de l'Arctique, il forme des motifs circulaires (tourbillons) qui rendent les bords du courant plus flous (voir https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2013/02/Sea-surface_salinity_and_currents#.X9n4wBIA-uQ.link).

2. Voir le tableau.

		Température moyenne estimée en °C	
	Mois	Gulf Stream	Gulf of Maine
Le plus chaud	Août	26	21
Le plus froid	Janvier	19	10

3. Voir la figure n° 8.

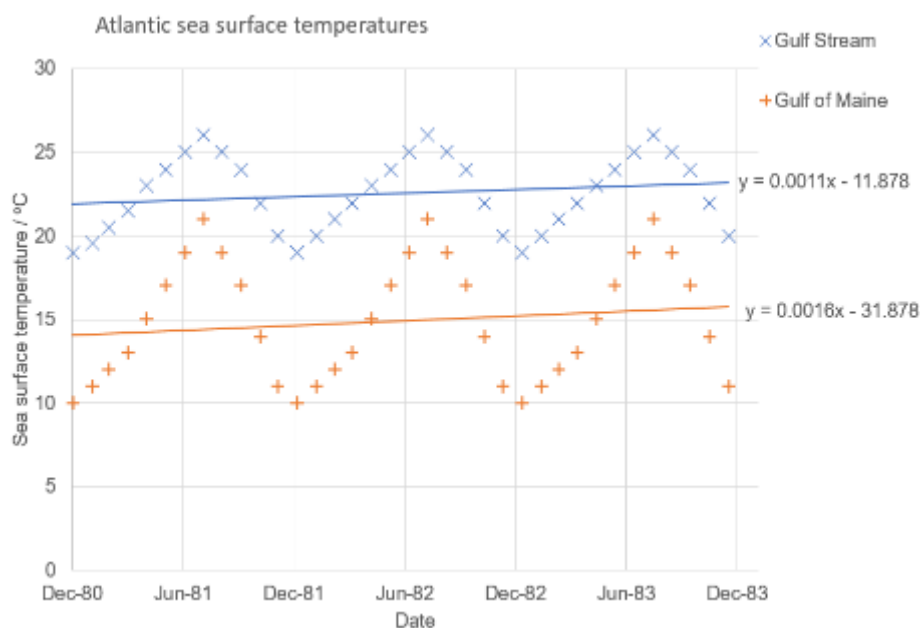


Figure 8 : Tracé des données de la feuille de calcul des Pompes à chaleur planétaires de l'activité n° 3 (Source : ESA CCI)

4. Les eaux du Gulf Stream sont plus chaudes et présentent moins de variations de température que celles du Gulf of Maine, bien que la même variation saisonnière soit visible dans les deux endroits.

Les températures moyennes augmentent dans les deux endroits.

L'augmentation est légèrement plus rapide dans le Gulf of Maine.

Les taux sont de $0,0011^{\circ}\text{C}/\text{jour} = 0,40^{\circ}\text{C}/\text{an}$ dans le Gulf Stream et de

$0,0016^{\circ}\text{C}/\text{jour} = 0,58^{\circ}\text{C}/\text{an}$ dans le Gulf of Maine.

Les données numériques de cette activité ont été téléchargées sur le site

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.

Fiche d'activité n° 1 : POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES

Utiliser vos connaissances en géométrie et les équations ci-dessous pour répondre aux questions n° 1 à 5. Faire attention aux unités et aux chiffres significatifs.

$$\text{Puissance (en W)} = \text{Energie (en J)} \div \text{temps (en s)}$$

$$\text{Énergie (en J)} = \text{masse (en kg)} \times \text{capacité thermique spécifique (en J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}\text{)} \\ \times \text{variation de température (en °C)}$$

1. Le rayon de la Terre est de 6 400 km. Quelle est la superficie de la planète en m^2 ?

2. Une estimation de l'énergie supplémentaire piégée en raison du réchauffement climatique est de $0,62 \text{ W m}^{-2}$. Quelle est la quantité totale d'énergie supplémentaire piégée dans le monde entier ?

a. Chaque seconde ? _____

b. Chaque année ? _____

3. Si toute cette énergie restait dans l'atmosphère, quelle serait l'augmentation annuelle de la température de l'atmosphère ?

masse totale de l'atmosphère = $5,14 \times 10^{18} \text{ kg}$

capacité thermique spécifique moyenne de l'air = $1\,158 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$

4. Si, au contraire, toute cette énergie allait dans les océans, quelle serait l'augmentation annuelle de leur température ?

masse totale des océans = $1,4 \times 10^{21} \text{ kg}$

capacité thermique spécifique moyenne de l'eau de mer = $3\,850 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$

5. Quel chiffre théorique est le plus élevé ? Pourquoi ? _____

En pratique, l'augmentation moyenne de la température de l'atmosphère est bien inférieure au chiffre que vous avez calculé, et les mesures de la température des océans montrent une augmentation bien plus importante.

6. Utiliser les idées de la fiche d'information pour vous aider à expliquer ces différences.

Fiche d'activité n° 2 : montée et descente des eaux

Matériel nécessaire

- Un grand récipient transparent
- Un petit récipient
- Un sac en plastique
- Un élastique
- Du colorant alimentaire ou de l'encre
- De la glace ou de l'eau glacée
- De l'eau chaude et de l'eau froide
- Un chronomètre ou une horloge (facultatif)
- Un appareil photo (facultatif)

Santé et sécurité

- Travailler soigneusement pour éviter les renversements et les éclaboussures qui pourraient produire des taches.
- Utiliser de l'eau chaude entre 40°C et 60°C - si on ne dispose pas d'eau chaude courante, mélanger l'eau bouillante d'une bouilloire avec de l'eau froide.
- Faire très attention lors de l'utilisation de récipients en verre.

Objectif

Nous allons étudier attentivement le comportement d'une eau à une température donnée lorsqu'elle est placée dans une eau à une autre température. Certaines combinaisons qui pourraient être essayées, sont présentées dans le tableau ci-dessous.

	Eau dans un grand récipient	Eau dans un petit récipient
1	Froide (du réfrigérateur ou refroidie avec de la glace)	Chaude
2	Chaude	Froide
3	Chaude	Froide (avec petit récipient horizontal)
4	Fraiche (du robinet d'eau froide)	Chaude

Que faire ?

1. Mettre de l'eau à une température donnée dans le grand récipient.
Le remplir aux trois quarts environ.
Le place sur une surface stable et laisser l'eau se déposer.
2. Mettre de l'eau à l'autre température dans le petit récipient.
Colorer cette eau avec du colorant alimentaire ou de l'encre. Elle doit être assez foncée.
Fabriquer un couvercle pour le petit récipient à l'aide d'un morceau du sac en plastique maintenu par un élastique ou une ficelle.
Faire quelques trous dans le couvercle, afin que l'eau colorée puisse s'échapper mais pas trop vite.
3. Déposer délicatement le petit récipient dans le grand, en perturbant l'eau le moins possible.



(Source : ESA CCI)

4. Noter vos observations. On pourra utiliser des descriptions, des dessins, des photographies, ou une combinaison de ces techniques. On pourra également noter l'heure à laquelle on voit apparaître certains évènements.
5. Lorsque l'eau a atteint un état stable (quand il ne semble plus y avoir de changement), vider les récipients et essayer une autre combinaison. On pourra essayer ses propres combinaisons, ou si les récipients permettent de le faire en toute sécurité, introduire l'eau du petit récipient à une hauteur différente.

Analyse des résultats

1. Résumer vos observations à partir de chacune des combinaisons que vous avez essayées comme suit :
 - Sélectionner les trois observations qui, ensemble, montrent le mieux comment la situation a évolué.
 - Décrire chacune d'elles en utilisant :
 - soit une phrase,
 - soit une image annotée,
 - soit un extrait de vidéo (pas plus de 5 secondes).
 - Expliquer ce qui se passe à chaque étape.
Utiliser des hypothèses sur la température et la densité.
2. Si on remarque quelque chose d'intéressant en comparant les observations pour deux combinaisons différentes (par exemple, les combinaisons 2 et 3, ou 1 et 4), alors :
 - On ajoutera une phrase supplémentaire ou une image composite, en soulignant les similitudes et les différences.
 - On expliquera ce qui a provoqué les similitudes ou les différences ainsi mises en évidence.
3. Expliquer comment, ce qui vient d'être vu, est lié à la circulation de l'eau et de l'énergie dans les océans. On pourra se référer à la fiche d'information n° 1.

Le professeur indiquera le format à utiliser pour partager les résultats avec lui ou avec le reste de la classe.

Enquête sur la salinité

Comment pourrait-on utiliser ce dispositif, pour étudier l'effet des différences de salinité sur le mélange entre les couches d'eau dans l'océan ?

- Penser aux endroits de l'océan où des masses d'eau ayant différents niveaux de salinité entrent en contact.
- Utiliser ces notions pour vous aider à choisir les combinaisons à étudier.
- On pourrait faire des analyses préliminaires pour étudier jusqu'à quelle limite on peut saler l'eau, ou faire des recherches pour découvrir à quel point les différentes parties de l'océan sont salées.

Etablir une stratégie et, si on a assez de temps, mener l'enquête.

Démonstration de la remontée de l'eau

De quelle manière pourrait-on utiliser ces hypothèses pour démontrer comment les vents du large entraînent la remontée d'eau froide des profondeurs de l'océan ?

Dessiner un diagramme étiqueté pour présenter vos hypothèses.

Fiche d'activité n° 3 : LE GULF STREAM

Ouvrir l'application web Climate from Space (cfs.climate.esa.int).

Cliquer sur le symbole « Couches de données » (en haut à droite) et choisir « Température de surface de la mer ».

Repasser l'animation plusieurs fois afin de vérifier que vous comprenez comment les commandes à l'écran vous aident à regarder plus précisément des endroits ou des moments particuliers.

Le Gulf Stream est un courant chaud de surface qui déferle le long de la côte de la Floride et traverse l'Atlantique Nord.

Modèles généraux

Redimensionner le globe dans Climate from Space, pour voir le Gulf Stream en détail, et suivre l'animation mois par mois pendant un an ou deux.

1. Comment le Gulf Stream se développe-t-il et change-t-il au cours d'une année ? Examiner des éléments tels que la distance qu'il parcourt chaque mois, la définition de ses limites et la différence de température entre le courant et l'océan environnant.

Pour en savoir plus sur le Gulf Stream, vous allez vous concentrer sur deux zones :

- Le Gulf Stream à l'est de Norfolk, en Virginie.
- Le Gulf of Maine.

Rechercher une carte sur internet afin de localiser ces deux zones et pouvoir ensuite utiliser la forme de la côte pour les identifier dans l'application web Climate from Space.

2. Pendant quels mois les eaux du Gulf Stream semblent-elles être les plus chaudes et les plus froides ? Faire une estimation de la température dans chaque cas et la comparer à celle du Gulf of Maine au cours des mêmes mois.

	Mois	Température moyenne estimée en °C	
		Gulf Stream	Gulf of Maine
Le plus chaud			
Le plus froid			

Changements de température

Ouvrir la feuille de calcul de l'Activité n° 3 « Des pompes à chaleur planétaires ». (Demander à votre professeur de vous indiquer comment y accéder.) La feuille de calcul présente certaines des données utilisées pour créer la visualisation dans l'application web Climate from Space.

- Tracer les deux ensembles de données sur un seul graphique avec la date sur l'axe *des x* et la température de surface des eaux sur l'axe *des y*. Utiliser le graphique pour vérifier les réponses à la question n° 2.

Ajouter une ligne de tendance linéaire pour chaque ensemble de données, en indiquant les équations de chaque ligne sur le graphique.

- D'après ces lignes et leur équation, qu'arrive-t-il à l'eau du Gulf of Maine et du Gulf Stream ? Chercher les similitudes et les différences et, si vous le pouvez, utiliser des valeurs pour étayer vos descriptions.

Etablir des relations

Découvrir le comportement et l'impact du Gulf Stream à l'aide de l'application web Climate from Space et d'autres sources.

Vous pouvez étudier l'une des questions suivantes ou une de vos propres questions.

- Comment le Gulf Stream affecte-t-il la distribution du phytoplancton dans l'océan Atlantique ? (Dans Climate from Space, utiliser la « Couche de données » sur « La couleur de l'océan »).
- Existe-t-il une relation entre le Gulf Stream et les modèles de circulation de la salinité dans l'Atlantique Nord ?
- Comment l'étendue de la banquise affecte-t-elle le Gulf Stream ?
- Y a-t-il des différences dans l'impétuosité de la mer le long de la trajectoire du Gulf Stream ? (Utilisez la « Couche de données » sur l'« État de la mer »).
- Y a-t-il des différences notables concernant la couverture nuageuse lorsque la température du Gulf Stream varie ?

Utiliser votre compréhension des échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et l'océan, afin de relier ces nouvelles informations aux modèles et tendances de la température de surface des eaux, que vous avez décrits ci-dessus.

Fiche d'information n° 1 : POMPES À CHALEUR PLANÉTAIRES

Si vous vous baignez dans la mer le jour de la Saint-Jean, l'eau peut être étonnamment froide. En effet, l'une des principales causes de noyade, surtout en été, est le choc dû à l'eau froide. Bien que le soleil soit au plus haut dans le ciel, et qu'il y ait plus d'heures d'ensoleillement que n'importe quel autre jour de l'année, la mer n'atteint sa température maximale que trois mois plus tard, en automne. Ce décalage montre que la mer a une capacité thermique élevée - il faut beaucoup d'énergie pour changer sa température, elle est donc lente à se réchauffer et lente à refroidir.

L'eau est incroyablement capable de stocker la chaleur. A tel point que les trois premiers mètres supérieurs de l'océan contiennent, à eux seuls, autant de chaleur que l'atmosphère tout entière - et l'atmosphère s'étend jusqu'à une hauteur de près de 100 kilomètres. La capacité de l'océan à stocker, transporter et libérer lentement l'énergie qu'il reçoit du soleil, en fait l'un des principaux régulateurs du climat de notre planète. Les couches supérieures de l'océan absorbent environ 90 % de l'excès de chaleur causé par le réchauffement de la planète.

Déplacer la chaleur dans le monde

L'équateur reçoit beaucoup plus d'énergie du Soleil que les régions polaires. Cependant, la circulation de l'océan et de l'atmosphère redistribue cette énergie autour du monde. Les courants océaniques sont entraînés par la rotation de la Terre, les vents de surface, et les différences de densité de l'eau dues aux différences de salinité et de température. Les couches supérieures de l'océan se déplacent généralement dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord, et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud.

Les courants chauds de surface, comme le Gulf Stream illustré sur la photo, apportent la chaleur de l'équateur et des tropiques vers les hautes latitudes. Ce transport de chaleur vers les pôles est responsable du climat doux de l'Europe occidentale. Dans le Pacifique, le courant de Kuroshio réchauffe la côte orientale du Japon, et il y a généralement un courant équatorial froid qui s'étend vers l'ouest depuis l'Amérique du Sud.



La carte du Gulf Stream de Benjamin Franklin, publiée en 1786.
(Source : Récupéré de la Bibliothèque du Congrès)

Ce que l'on appelle la grande ceinture de transport océanique, ou circulation thermohaline, s'étend dans les profondeurs de l'océan et englobe La Terre entière. L'eau met environ 1000 ans pour la parcourir.

Les océans et l'atmosphère transportent chacun à peu près la même quantité de chaleur vers les pôles. La circulation de l'atmosphère est en partie déterminée par l'énergie échangée lorsque l'eau des océans s'évapore et que la pluie tombe. Les eaux (mers et océans), sont donc un important régulateur du climat, et la température à leur surface est une mesure clé pour les climatologues.

L'effet du réchauffement des océans

Des températures de surface des eaux plus élevées entraînent une plus grande évaporation. Une plus grande quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est susceptible d'augmenter la couverture nuageuse et la quantité de pluie. En Méditerranée occidentale, le réchauffement des eaux est un facteur clé dans le développement des pluies torrentielles et des crues soudaines qui touchent les côtes françaises, italiennes et espagnoles à la fin de l'été.

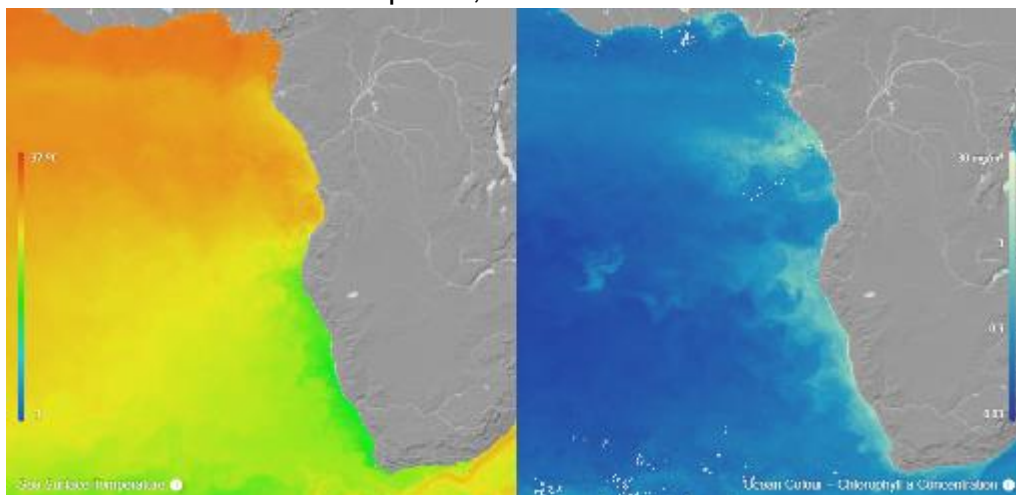
À plus grande échelle, les températures élevées de l'eau dans les océans tropicaux, favorisent les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les ouragans. L'échange d'énergie entre l'océan et l'atmosphère est tel, que la température de surface des eaux dans le sillage d'un grand ouragan, peut chuter de manière significative.

Les cartes de la température de surface des eaux, montrent non seulement les courants chauds et froids, mais aussi les endroits où l'eau froide remonte, c'est-à-dire qu'elle remonte des profondeurs de l'océan vers la surface. Cela se produit lorsque l'eau de surface est poussée vers le large par les vents dominants.

Surveillance de l'océan

Il est probable que la partie supérieure de l'océan se réchauffe depuis le milieu du XIXe siècle. Cependant, les scientifiques ne sont en mesure de mesurer le réchauffement de la surface des océans depuis l'espace, que depuis les années 1970. Des satellites équipés de caméras infrarouges mesurent la température des océans, avec une précision de quelques dixièmes de degré Celsius.

Certains de ces satellites, sont équipés de capteurs qui fournissent des mesures très précises, pour une petite zone de l'océan, à un moment donné ; d'autres détectent la température moyenne, d'une zone plus large, et peuvent donc collecter des données pour la Terre entière, tous les quelques jours. Les climatologues ont combiné les informations fournies par les capteurs de toute une série de satellites, pour produire des données fiables et de haute qualité, montrant comment l'océan a évolué ces

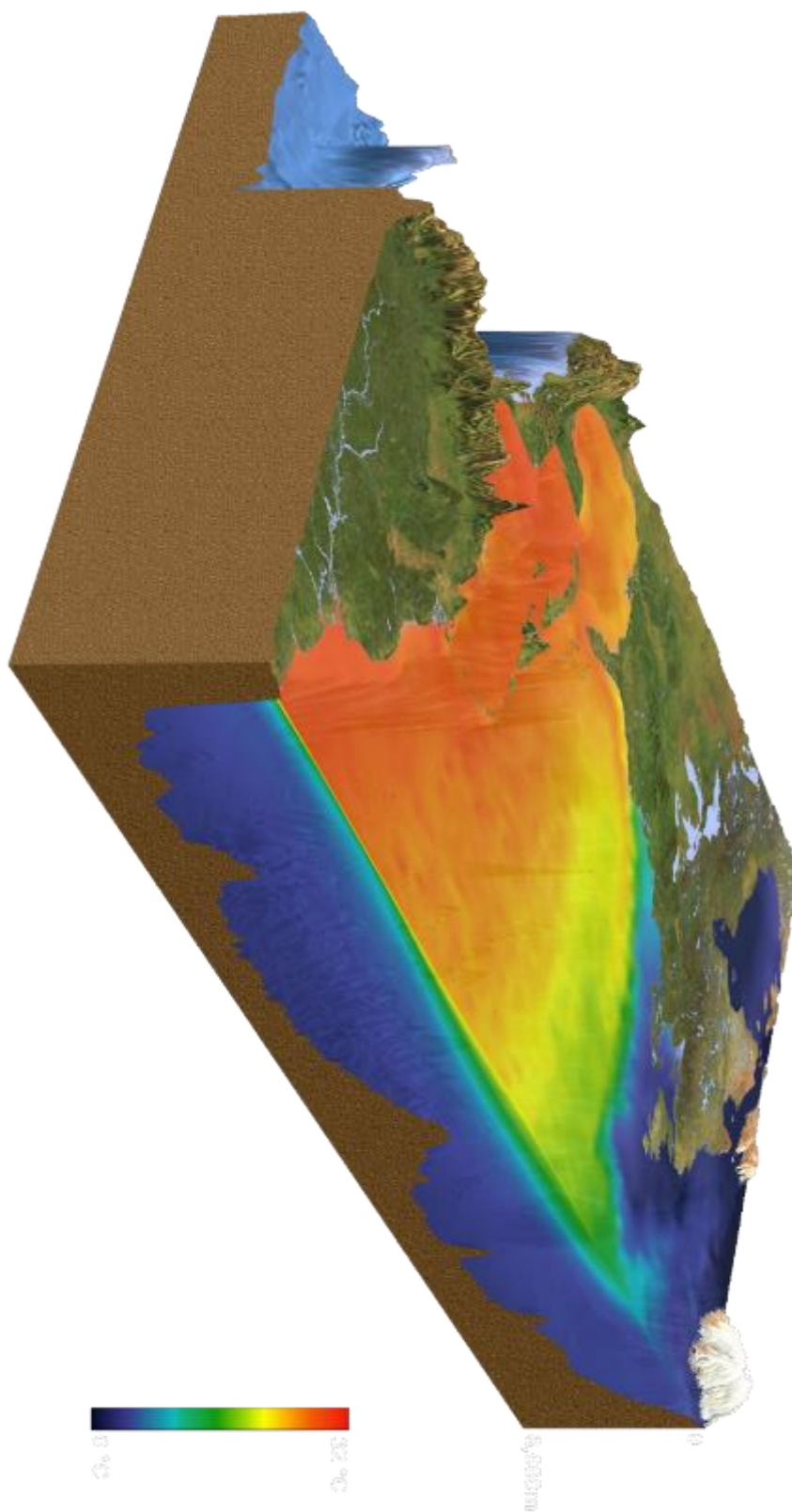


Température à la surface des eaux et chlorophylle de l'océan, le long de la côte africaine. L'eau froide des remontées d'eau, transporte les nutriments du fond de la mer, sur lesquels le plancton se développe. (SOURCE : ESA CCI)

dernières années. Les ensembles de données couvrent non seulement les températures, mais aussi des variables telles que la salinité, le niveau des eaux, la hauteur des vagues, et les niveaux de chlorophylle (à partir desquels nous pouvons déterminer l'abondance du phytoplancton, à la base de la chaîne alimentaire océanique).

Fiche d'information N° 2 : TEMPÉRATURE ET PROFONDEUR DE L'OcéAN

Coupe transversale de l'Atlantique Nord montrant comment la température de l'océan varie en surface et en profondeur. (Source : Planetary Visions)



Liens

Ressources

Application web Climate from Space

<https://cfs.climate.esa.int>

Climat pour les écoles

<https://climate.esa.int/fr/educate/climate-for-schools/>

Enseigner avec l'espace

http://www.esa.int/Education/Teachers_Corner/Teach_with_space3

Enquête sur le Gulf Stream avec LEO Works

https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Weather_EN/SEM29YK1YHH_0.html

Projets spatiaux de l'ESA

Bureau du climat de l'ESA

<https://climate.esa.int/>

De l'espace pour notre climat

http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate

Les missions d'observation de la Terre de l'ESA

www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/ESA_for_Earth

Explorateurs de la Terre

http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers

Sentinelles Copernic

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4

SMOS - Humidité du sol et salinité des océans

http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/New_maps_of_salinity_reveal_the_impact_of_climate_variability_on_oceans

Informations supplémentaires

Cartographie des eaux salées

http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Mapping_salty_waters

Vidéo sur la température de surface de la mer

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/09/Sea-surface_temperature#.X9oKgkStwEY.link

Autres vidéos de la Terre vue de l'espace

http://www.esa.int/ESA_Multimedia/Sets/Earth_from_Space_programme

ESA Kids

https://www.esa.int/kids/en/learn/Earth/Climate_change/Climate_change