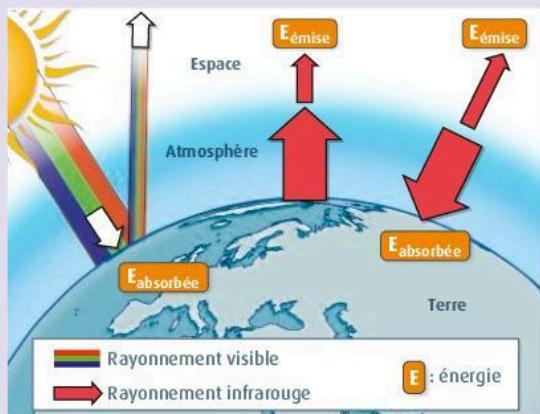




POUR BIEN COMMENCER

Quelques notions déjà vues

ES 1^{re} Effet de serre et bilan radiatif



- Si $E_{\text{absorbée}} = E_{\text{émise}}$
forçage radiatif nul (équilibre radiatif)
- Si $E_{\text{absorbée}} > E_{\text{émise}}$
forçage radiatif positif
- Si $E_{\text{absorbée}} < E_{\text{émise}}$
forçage radiatif négatif

ES 1^{re} Albédo

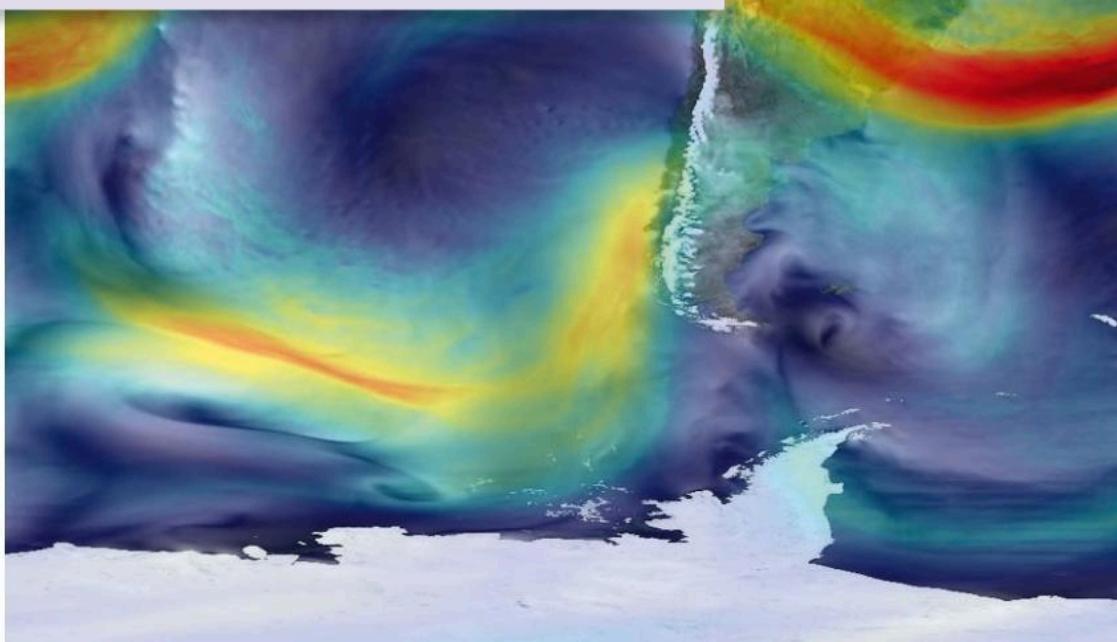
- L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface.
- C'est une grandeur sans dimension : $0 \leqslant \text{albédo} \leqslant 1$.
- Un albédo de 0,4 signifie que la surface réfléchit 40 % de la puissance reçue.
- L'albédo moyen de la surface terrestre est 0,3.

Se tester avant de démarrer

Savez-vous répondre aux questions suivantes ?

1. La vie serait-elle possible sur Terre sans l'effet de serre ?
2. Quelle est la conséquence d'un forçage radiatif positif sur la température terrestre ?
3. Si les calottes polaires fondent, quelle est la conséquence sur l'albédo ?

Modélisation des vents à la surface de la Terre par le système GEOS-5 de la NASA. Les vents de surface ($0 \text{ à } 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) en blanc sont peu visibles. Les vents d'altitude plus élevés sont colorés de jaune à rouge selon leur vitesse (de 0 à $175 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), les rouges étant les plus rapides.



CHAPITRE

2

LA COMPLEXITÉ DU SYSTÈME CLIMATIQUE

Quels facteurs agissent sur le système climatique et son évolution dans le temps?

Climat et météo, une affaire d'échelle

La confusion entre un épisode météorologique et un phénomène climatique est très répandue, mais elle conduit naturellement à des raisonnements et des conclusions fausses. Il est donc essentiel de savoir comment distinguer l'un de l'autre.

Quelles sont les différences entre météorologie et climatologie ?
Comment passer de l'une de ces disciplines à l'autre ?



Traduction du tweet

 Donald J. Trump  @realDonaldTrump

In the East, it could be the COLDEST New Year's Eve on record. Perhaps we could use a little bit of that good old Global Warming that our Country, but not other countries, was going to pay TRILLIONS OF DOLLARS to protect against. Bundle up!

1:01 AM · Dec 29, 2017 · Twitter for iPhone

54.4K Retweets 183.6K Likes

DOC 1 Tweet de Donald Trump du 29 décembre 2017.

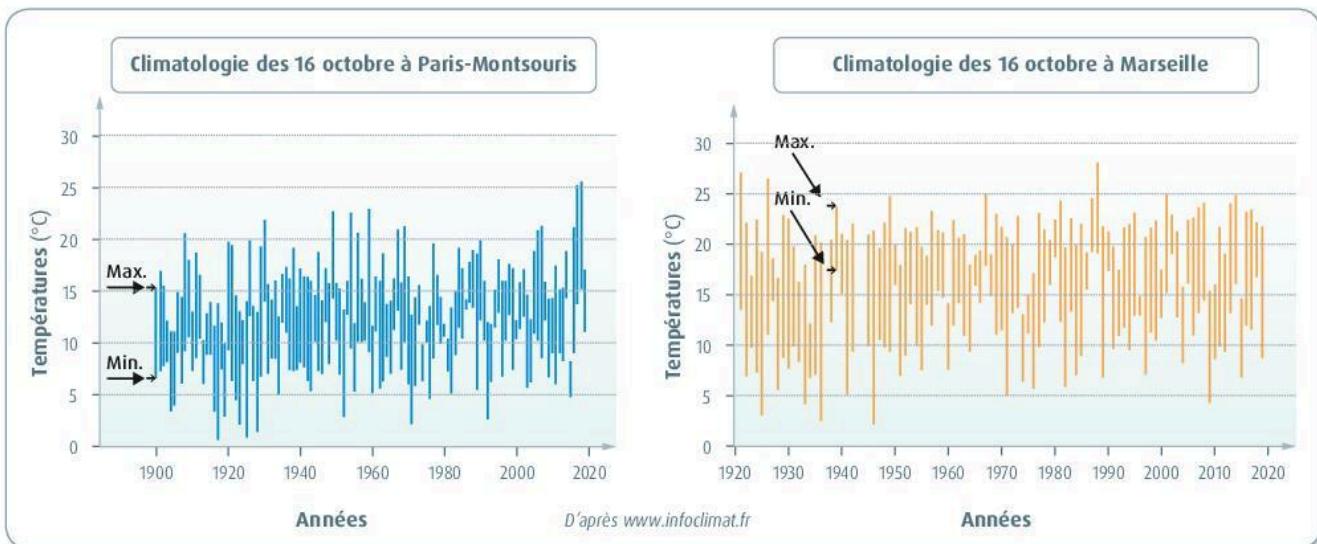
| | Station Paris Montsouris | Station Marseille Marignane |
|--|---|--|
| Température | 12,4 °C | 10,0 °C |
| Humidité atmosphérique | 95 % | 81 % |
| Précipitations | 0,4 mm·h ⁻¹ | 0 mm·h ⁻¹ |
| Vitesse moyenne du vent (vitesse max. des rafales) | 14 km·h ⁻¹ (39 km·h ⁻¹) | 7 km·h ⁻¹ (14 km·h ⁻¹) |
| Direction du vent | 200° | 120° |
| Pression atmosphérique | 1010 hPa | 1018 hPa |
| Visibilité (distance) | 11 km | 45 km |

DOC 2 Données météorologiques à Paris et à Marseille le 16 octobre 2019 à 6 h 00 du matin.

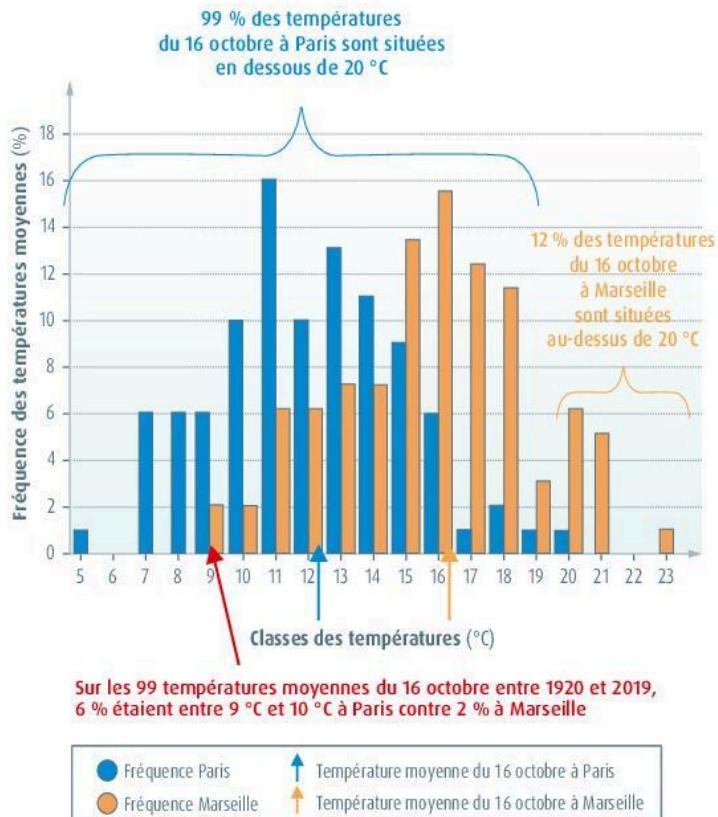
| | Échelle temporelle | Échelle spatiale | Grandeur étudiée (exemples) | Phénomènes étudiés (exemples) |
|--------------|--------------------------|----------------------------------|---|---|
| Météorologie | De l'heure à la semaine. | De la station météo à la région. | Température et pression atmosphérique journalières à Paris. Précipitations et nébulosité* (ou visibilité) de la semaine à Marseille. | Trajectoire de la tempête Éléonore du 2 au 4 janvier 2018. Quantité d'eau de pluie reçue pendant les orages du 18 août 2019 à Marseille. |
| Climatologie | Du mois au millénaire. | De la région au globe. | Température et pression atmosphérique moyennes annuelles sur 30 ans en Île-de-France. Précipitations et nébulosité* du mois de juin depuis 30 ans en Provence. | Intensité et fréquence des tempêtes survenues en France depuis 30 ans. Intensité et fréquence des épisodes de sécheresses en France. |

DOC 3 Météorologie et climatologie.

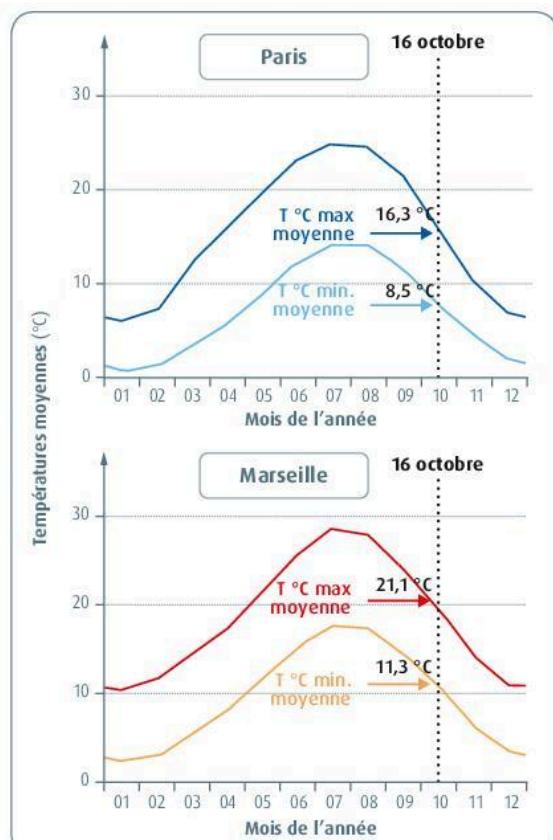
*La nébulosité est la couverture nuageuse mesurée à un moment et un endroit donnés. Elle peut être exprimée par la visibilité: plus on voit loin plus la nébulosité est faible.



DOC 4 Les températures des 16 octobre depuis 100 ans à Marseille et à Paris.



DOC 5 Fréquence depuis 100 ans des températures moyennes du 16 octobre à Paris et à Marseille. Les températures en abscisses correspondent à des classes de température. Ainsi, la valeur 7 correspond aux températures moyennes comprises entre 7 et 7,99 °C.



DOC 6 Températures minimales et maximales sur l'année à Paris et Marseille (moyennes calculées sur 100 ans).



Calculs d'une température moyenne journalière

Les moyennes de température sont des outils statistiques fondamentaux en climatologie. Pour une moyenne temporelle journalière, on peut calculer, faute de mieux la moyenne des températures minimale et maximale de la journée ou celle des 8 mesures prises toutes les 3h pendant 24h. Le résultat sera différent puisque les données utilisées ne sont pas les mêmes. On peut ensuite faire des moyennes mensuelles ou annuelles des moyennes journalières. On calcule une moyenne spatiale à partir des mesures des stations météorologiques. En France métropolitaine,

554 stations de Météo France envoient des données toutes les 6 min. Selon un même principe, on détermine qu'il fait en moyenne -20 °C au Groenland, 25 °C au Sahara et +10 °C sous nos latitudes tempérées. Sur les continents, la moyenne de plus de 10000 températures locales donne une température de 14 °C. Ce n'est pas une grandeur physique perceptible mais une grandeur statistique utile pour faire des comparaisons et dont les scientifiques s'assurent de la pertinence en utilisant un grand nombre de points de mesure.

DOC 7 La pertinence d'une «température moyenne».

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Indiquez les données atmosphériques étudiées en météorologie et en climatologie. Précisez ce qui distingue ces deux disciplines (**DOCS 2 et 3**).
- Justifiez le besoin d'utiliser des moyennes pour comparer le climat de Paris et Marseille (**DOC. 4**).
- Expliquez quelle ville a le climat le plus chaud entre Paris et Marseille (**DOCS 2 et 4**). Précisez si on peut en déduire qu'il fait toujours plus chaud à Marseille qu'à Paris (**DOCS 2 et 7**).
- Dans un tweet de 280 caractères maximum, expliquez la différence entre météo et climat (**DOC. 1**).

ESPRIT CRITIQUE

La climatologie utilise des grandeurs moyennes.

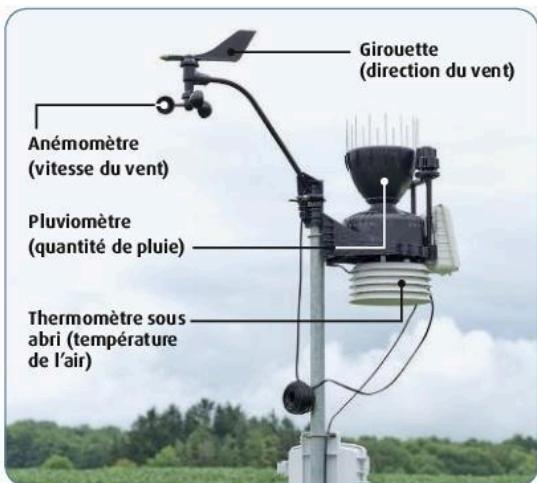
- Quel intérêt et quelle limite voyez-vous à l'utilisation de températures moyennes en climatologie ?
- La température moyenne vous semble-t-elle suffisante pour définir un climat ?

Pistes de travail ► **DOC. 7**

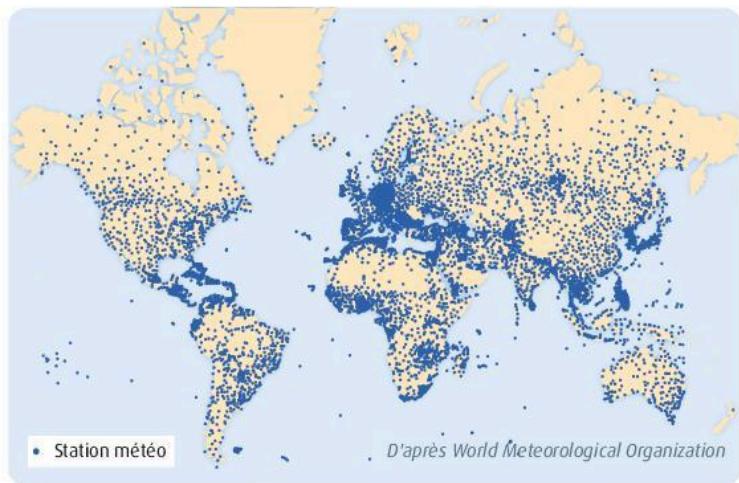
Les indicateurs des climats passés et actuels

Si des millions de données météorologiques collectées dans le monde à chaque instant permettent l'étude du climat actuel, d'autres indicateurs sont nécessaires pour retracer l'histoire des climats passés de la Terre.

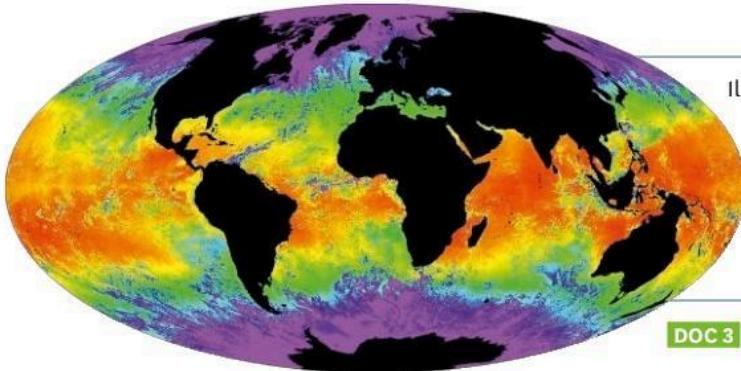
Quels méthodes et indicateurs permettent d'étudier les climats actuels et passés ?



DOC 1 Les instruments de mesure d'une station météo.



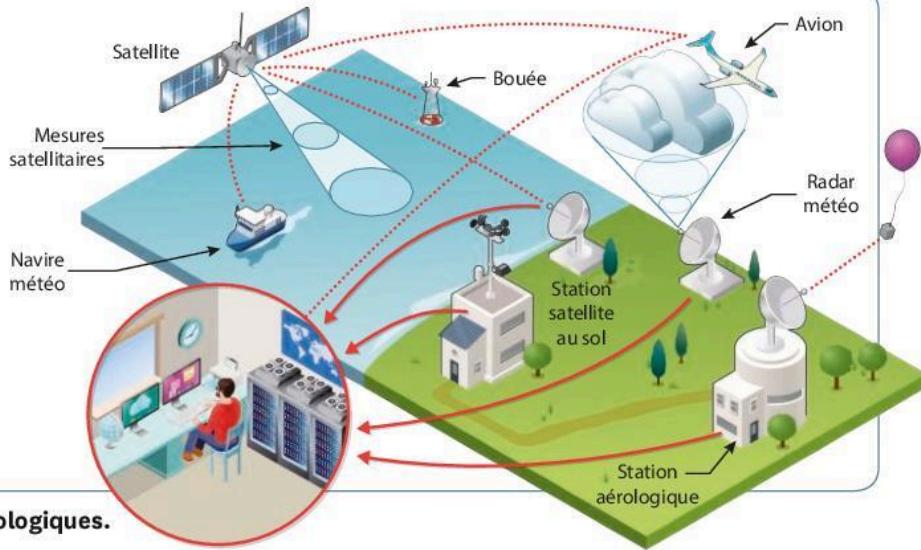
DOC 2 Réseau mondial des stations météo. Les premiers réseaux de stations météo datent du XIX^e siècle. Aujourd'hui 11 000 stations au sol couvrent l'ensemble des terres émergées.



Il est possible de mesurer la température de la surface du globe depuis un satellite. En effet, plus une surface est chaude et plus elle émet de rayonnements infrarouges. Ceux-ci peuvent ainsi être mesurés depuis l'espace en l'absence de couverture nuageuse. Cette technique est surtout utilisée pour les surfaces océaniques. Sur les continents, le couvert végétal, entre autres, modifie les propriétés d'émissions dans les infrarouges.

DOC 3 Les mesures de température par satellite.

Les stations météorologiques situées à terre sont complétées par des bouées et des navires prenant des milliers de mesures quotidiennes sur tous les océans. Des sondes attachées à des ballons ou dans les avions de ligne permettent d'envoyer des données de différentes altitudes à des récepteurs situés sur la terre. Enfin des radars météorologiques permettent d'obtenir des données sur les précipitations. L'organisation météorologique mondiale (OMM) coordonne la collecte et l'analyse des données, permettant une surveillance météorologique et climatique à l'échelle mondiale.



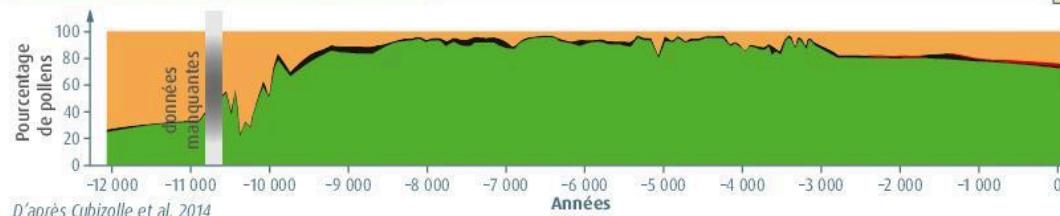
DOC 4 Le devenir des données météorologiques.

Les variations de climat ont des conséquences sur de nombreux phénomènes à la surface du globe. Par exemple, un refroidissement du climat s'accompagne d'une modification de la végétation et de plus de glaciers à la surface de la Terre. Si ces phénomènes ont lieu dans le passé et ont laissé des indices observables aujourd'hui, ces indices deviennent des indicateurs des climats du passé. C'est le cas de pollens enfouis dans les sédiments des lacs ou de traces laissées dans les paysages par des glaciers anciens. L'analyse de ces indicateurs permet de reconstituer les climats de passé en utilisant le **principe d'actualisme**: «les lois régissant les phénomènes actuels étaient également valables dans le passé».

DOC 5 Les conséquences des variations du climat comme indicateurs climatiques.



Collecter et dater les pollens des tourbières



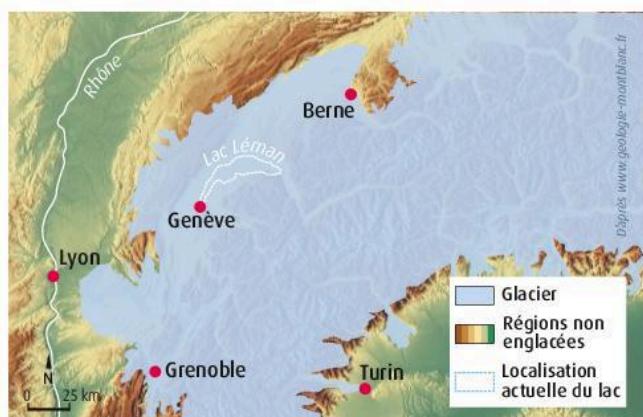
Une tourbière est une zone humide dans laquelle la matière organique se décompose peu : des pollens de plantes de différentes époques restent prisonniers sans se décomposer dans les sédiments qui s'accumulent. Plus on creuse profond, plus on remonte loin dans le temps. L'analyse des pollens permet

de reconstituer la végétation et donc le climat de l'époque en utilisant le principe d'actualisme. Ainsi, la végétation herbacée domine dans les climats froids ou à proximité des glaciers alors que les arbres se développent dans des climats un peu plus chauds.

DOC 6 L'analyse des pollens dans la tourbière de la Roche Gourgon (Monts du Forez).



DOC 7 Des indices laissés par les glaciers. En se déplaçant, les glaciers creusent des vallées à fond plat. Les moraines (blocs de roche anguleux de tailles variées) sont des sédiments qui s'accumulent sur les bords et à l'avant des glaciers. Lorsque le glacier diminue, les moraines et la vallée indiquent son ancien emplacement.



DOC 8 Reconstitution des glaciers alpins il y a environ 20 000 ans. Les indices du paysage (vallées glaciaires et moraines notamment) permettent aux scientifiques de reconstituer les glaciers alpins d'il y a environ 20 000 ans. Beaucoup des anciennes vallées glaciaires sont aujourd'hui devenues des lacs ou des vallées de fleuve (comme le Rhône).

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Présentez, sous forme d'un texte ou d'un schéma, comment les climatologues caractérisent le climat d'une région du monde (**DOCS 1 à 4**).
- Indiquez si le climat à -10 000 et -2 000 ans est un climat plutôt froid ou chaud. Justifiez (**DOCS 5 et 6**).
- Indiquez comment les scientifiques ont reconstitué la carte des glaciers alpins d'il y a 20 000 ans. Indiquez ce que cette carte nous apprend sur le climat à cette époque.
- À l'aide de Google maps, comparez cette carte avec les glaciers actuels présents dans les Alpes (se positionner entre Genève, Grenoble et Turin). Concluez (**DOC. 8**).

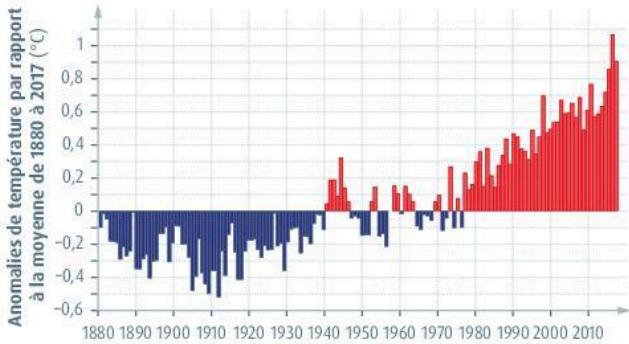
ESPRIT CRITIQUE

Le principe d'actualisme est très utilisé en géologie.
→ Comment et pourquoi le principe d'actualisme est-il utilisé ?
→ Quelles sont ses limites ?
Pistes de travail ► Recherche Internet et DOC. 7

Le changement climatique actuel

Les changements climatiques sont des événements normaux dans la vie de notre planète. Le dernier en date, nous sommes en train de le vivre, et il fait souvent la une de l'actualité.

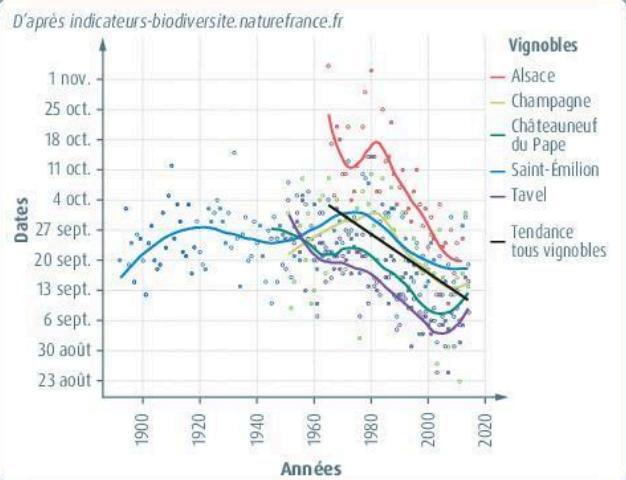
Comment se manifeste ce changement climatique et quels phénomènes physiques peuvent l'expliquer ?



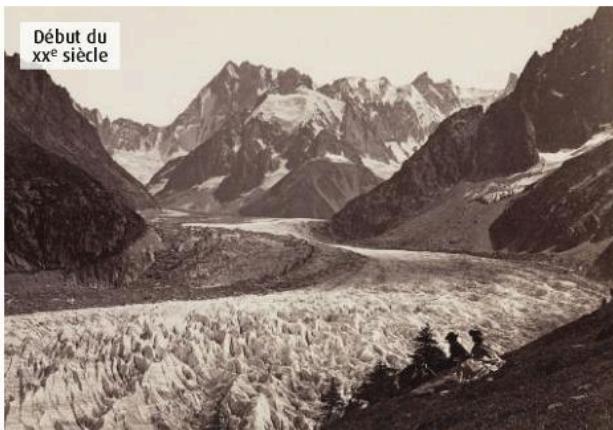
D'après www.noaa.gov

Années

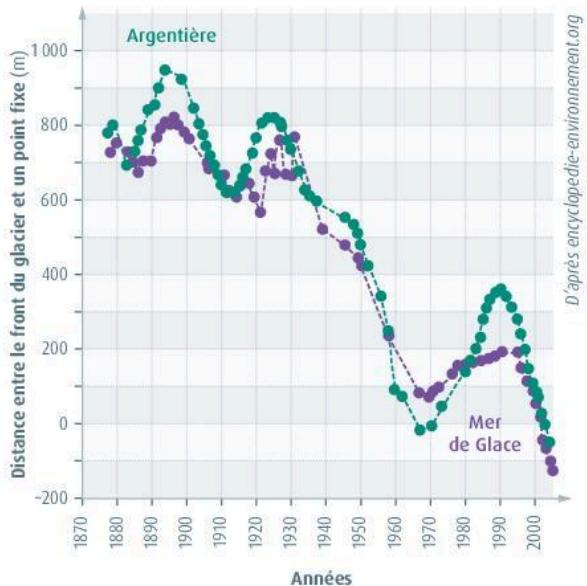
DOC 1 Températures mondiales moyennes annuelles entre 1880 et 2017. La moyenne des températures entre 1880 et 2017 est prise ici comme référence : on lui attribue la valeur 0 et on note les écarts des températures moyennes annuelles par rapport à cette référence.



DOC 2 Date de vendanges en France de 1892 à 2014.



DOC 3 Évolution du glacier du Rhône entre le début du xx^e siècle et 2016.



DOC 4 Fluctuation de la mer de Glace, et du glacier de l'Argentière, dans le massif du Mont-Blanc.

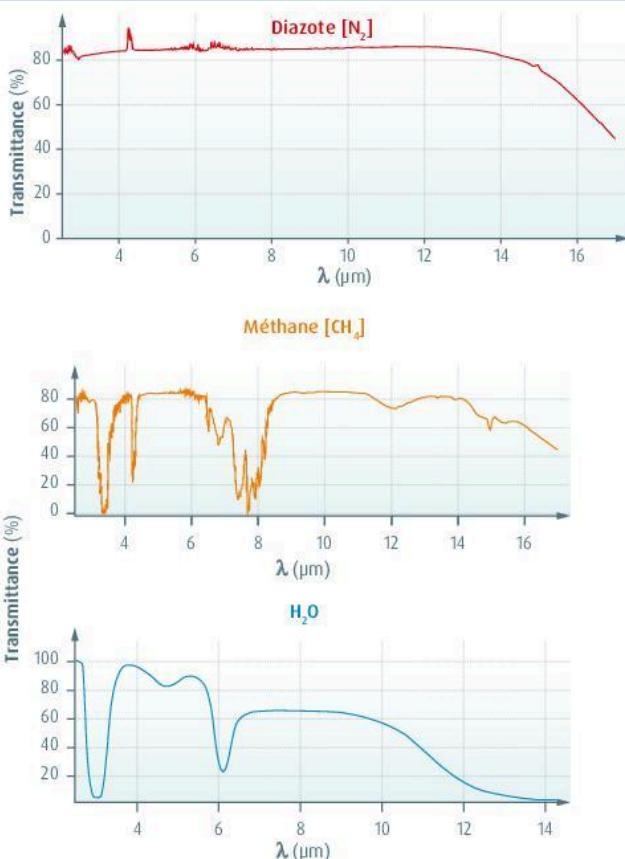
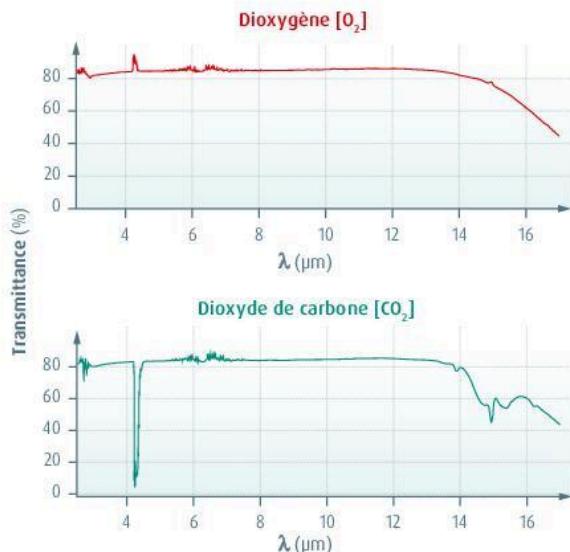
RAppELS UTILES

- L'effet de serre, p. 40.
- Le bilan radiatif terrestre, p. 40.
- Le forçage radiatif, p. 40.

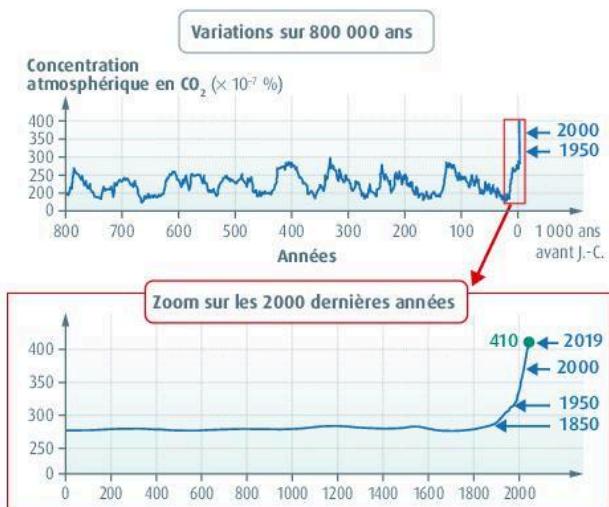


Réalisation d'un spectre d'absorption IR

Le diazote est un gaz qui n'absorbe quasiment pas dans l'infrarouge. On mesure ici la transmittance. Cette dernière est d'autant plus faible que l'échantillon absorbe le rayonnement.



DOC 5 Spectres d'absorption dans l'infrarouge de quelques gaz atmosphériques.



D'après Meinshausen et al. 2017

DOC 6 Évolution de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère depuis 800 000 ans. Les variations de la concentration de CO₂ avant la révolution industrielle (xixe siècle) ne sont bien sûr pas liées à l'action des humains. Elles sont la conséquence d'un phénomène de rétroaction lié au cycle du carbone (**unité 4** p. 28).

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Expliquez en quoi l'évolution des indicateurs observés est en cohérence avec un réchauffement global du climat (**DOCS 1 à 4**).
 - On sait que le sol terrestre émet des infrarouges compris entre 7 000 et 15 000 nm. Justifiez les longueurs d'onde pour réaliser les spectres du **DOC. 5**.
 - Identifiez les gaz qui participent à l'effet de serre en justifiant vos choix (**DOC. 5**).
 - Recherchez sur internet le spectre IR de l'oxyde nitreux (N_2O) et conclure sur sa capacité à participer à l'effet de serre. (*Aide pour la lecture des graphes trouvés.*
En abscisse : $1000 \text{ cm}^{-1} = 10 \mu\text{m}$ et $10 000 \text{ cm}^{-1} = 1 \mu\text{m}$.)
 - Comparez la variation de CO_2 sur 800 millénaires et sur les 2 derniers millénaires. Déduez-en les conséquences sur le forçage radiatif terrestre (**DOC. 6**).

ESPRIT CRITIQUE

Lors de débats sur le réchauffement climatique, on entend parfois cette affirmation : « La concentration de CO₂ atmosphérique a déjà atteint des valeurs similaires dans l'Histoire de la Terre. »

- Qu'en pensez-vous ? ([DOC. 6](#))
 - Quelle donnée vous semble importante lorsqu'on analyse l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique ?

Pistes de travail ► DOC. 2 p. 72

Climat et rétroactions

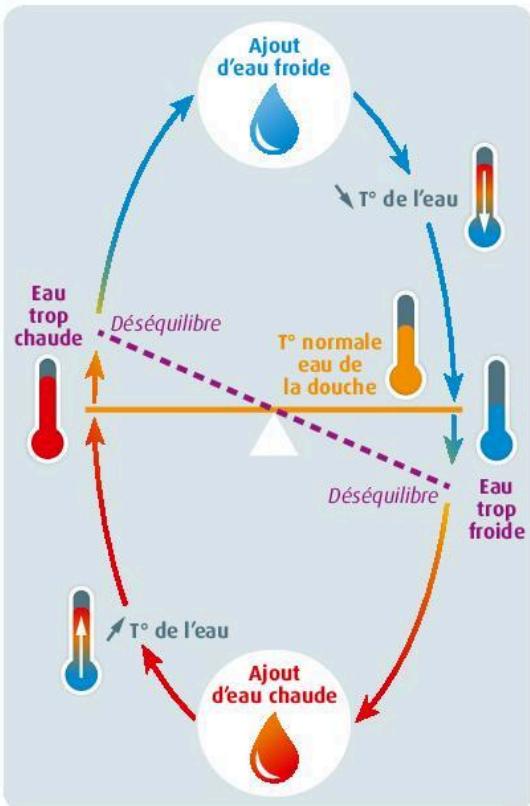
La température moyenne du globe a des conséquences sur un grand nombre de phénomènes. Certains d'entre eux ont à leur tour un effet sur la température moyenne : on appelle ces mécanismes « rétroactions ».

Leur connaissance est essentielle pour développer des modèles prédictifs du climat.

Quels mécanismes aggravants ou amortissants à l'échelle planétaire se mettent en œuvre suite à une hausse de la température moyenne du globe ?

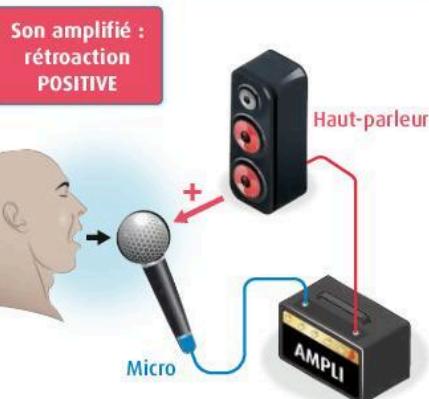
La rétroaction est, au sens large, l'action en retour d'un effet sur le dispositif qui lui a donné naissance. Une boucle de rétroaction est un dispositif qui lie l'effet à sa propre cause, avec ou sans délai. La notion de boucle de rétroaction est présente dans un grand nombre de phénomènes physiques, chimiques, biologiques ou de société : tous les phénomènes dans lesquels le résultat d'une action est à nouveau renvoyé dans le phénomène soit pour l'accentuer soit pour le freiner.

DOC 1 Définition d'une rétroaction.

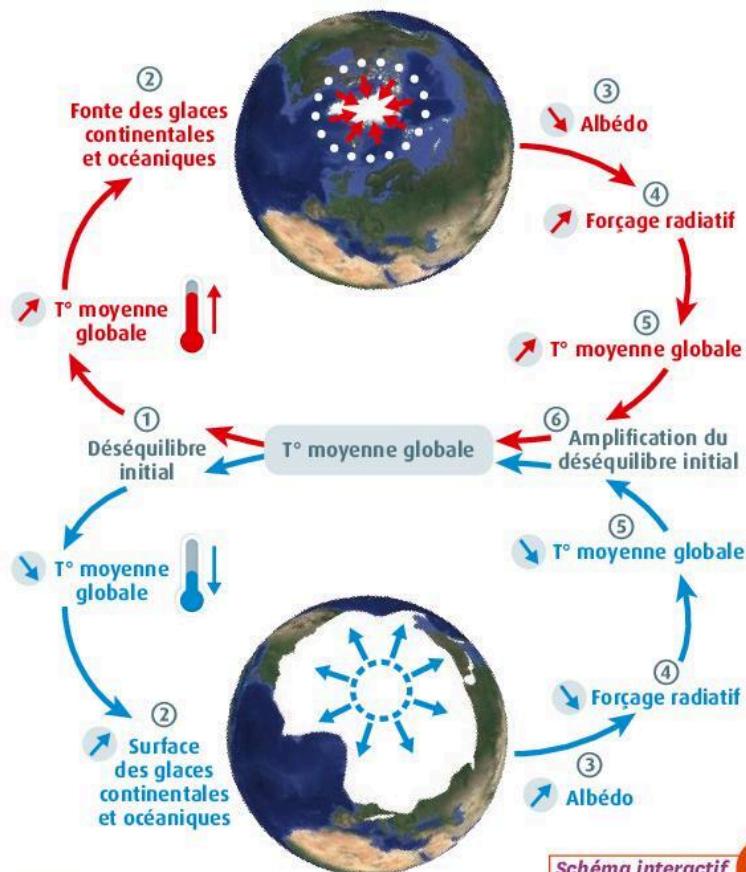


DOC 3 Une rétroaction négative connue : la régulation de la température de l'eau de la douche par deux boucles de rétroactions négatives.

Si on place un micro trop proche du haut-parleur qui diffuse le son capté par le micro, alors le son est rapidement amplifié plusieurs fois. Le son émis par le haut-parleur est capté par le micro, puis amplifié par la sono, puis réémis par le haut-parleur, et ainsi de suite. Il y a un bouclage amplificateur : c'est une rétroaction positive appelée effet Larsen.

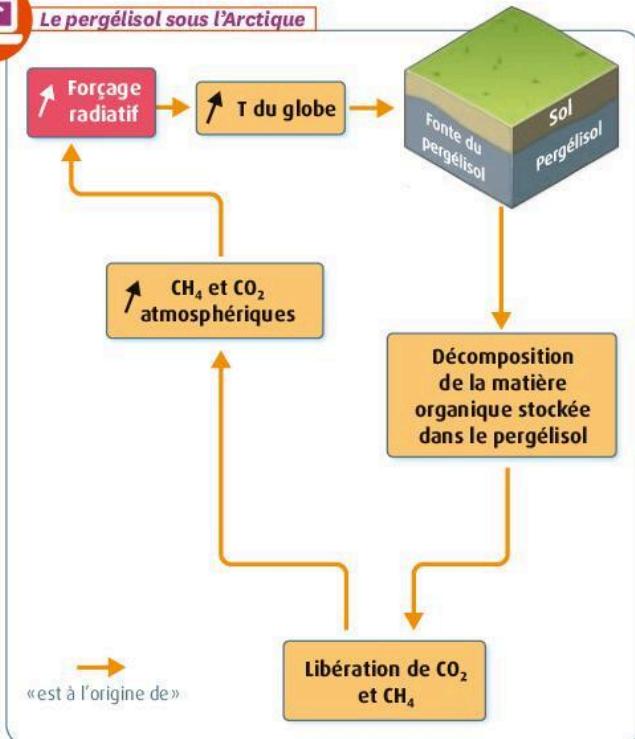


DOC 2 Une rétroaction positive connue : l'effet Larsen.

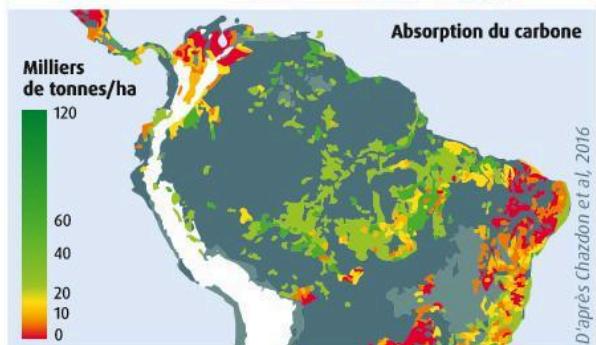


DOC 4 Schématisation d'une rétroaction positive au niveau du climat : l'effet de l'albédo.

Schéma interactif

**Le pergélisol sous l'Arctique**

Le CO₂ est absorbé par les jeunes plantes chlorophylliennes lors de leur croissance. On dit que ces dernières jouent le rôle de puits de carbone. Dans un monde qui atteint des niveaux inégalés de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la végétation croît plus rapidement. La végétation pourrait ainsi, au moins à court terme, être à l'origine d'une rétroaction négative sur le système climatique.



DOC 5 La bombe du pergélisol. La fonte du pergélisol représente une rétroaction positive sur l'augmentation de température, conséquence d'un forçage radiatif positif.

DOC 6 Modélisation de l'absorption du CO₂ par la forêt amazonienne. La carte du haut montre l'âge des arbres en 2008; celle du bas, les résultats d'une modélisation de l'absorption de carbone de 2008 à 2048. ha: hectare.

Chaque élément de la liste représente un phénomène. On peut construire plusieurs boucles de rétroaction positives ou négatives sur la température moyenne du globe à partir de ces phénomènes.

- | | | |
|---|---|---|
| ▶ Augmentation du nombre de nuages | ▶ Augmentation de l'albédo de l'atmosphère | ▶ Augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère |
| ▶ Plus de GES dans l'atmosphère | ▶ Fonte des neiges et glaces | ▶ Augmentation de l'évaporation |
| ▶ Moins de GES dans l'atmosphère | ▶ Absorption de CO ₂ réduite dans les océans | ▶ Augmentation de la température |
| ▶ Augmentation de la température des océans | ▶ Augmentation de la végétalisation | ▶ Augmentation de l'absorption de CO ₂ par les plantes en croissance |
| ▶ Diminution de l'albédo terrestre | | |

DOC 7 Quelques événements liés au forçage radiatif positif. On rappelle que les nuages augmentent l'albédo terrestre.

EXPLOITER LES DOCUMENTS**Par groupes de 4 ou 5 :**

1. Découvrez les documents, et assurez-vous que chaque membre du groupe a bien compris la notion de rétroaction.
2. Construisez les boucles de rétroaction suivantes :
 - a. Réaction négative de la végétalisation ;
 - b. Réaction positive de la vapeur d'eau dans l'atmosphère ;
 - c. Réaction négative de la vapeur d'eau dans l'atmosphère ;
 - d. Réaction positive de la température des océans ;
 - e. Réaction positive de la fonte des neiges et glaces.
3. Préparez une présentation orale de groupe (3 min max.) pour exposer un exemple de rétroaction.

ESPRIT CRITIQUE

Les modèles numériques du climat présentent des variabilités dues à la modélisation des nuages.

→ Pourquoi est-il difficile d'anticiper les conséquences de la vapeur d'eau sur le climat ?

Vous vous aiderez des boucles de rétroaction de la vapeur d'eau construites dans cette unité.

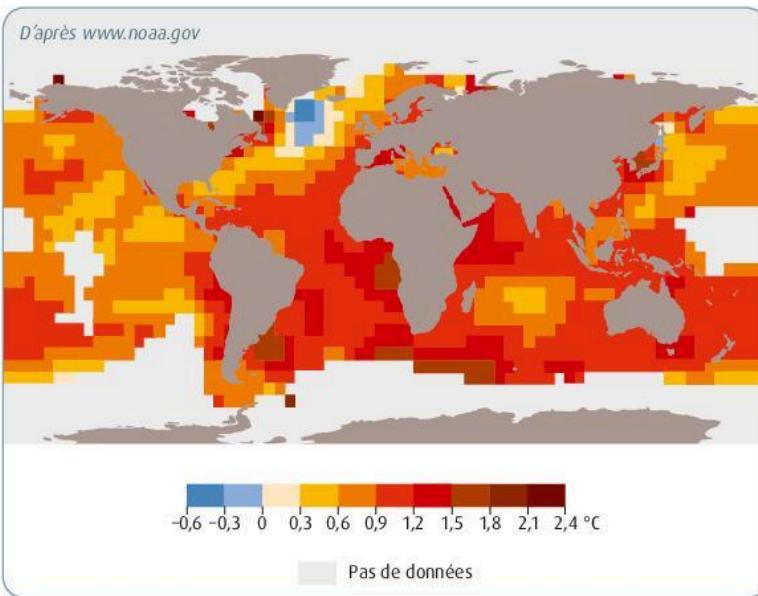
Pistes de travail ► DOC. 3 p. 68



L'océan, un acteur clé du climat

Une conséquence bien connue du réchauffement climatique actuel est qu'il va entraîner une élévation du niveau marin. En revanche, des idées fausses circulent quant aux mécanismes à l'origine de cette montée des eaux.

Comment expliquer l'élévation du niveau marin lié au réchauffement climatique ?



DOC 1 Évolution de la température de l'océan entre 1901 et 2015.



**Interview de Sabrina Speich,
océanographe et climatologue**

La capacité de l'océan à stocker l'énergie thermique est bien plus efficace (absorption de 93 % de l'excédent d'énergie résultant de l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre due aux activités humaines) que celle des continents (3 %) et de l'atmosphère (1 %). Cette capacité thermique élevée de l'océan lui permet de stocker l'essentiel du surplus d'énergie venant du forçage radiatif positif. Ainsi, des mesures de température océaniques collectées sur les 5-6 dernières décennies sur 1000 à 2000 m de profondeur

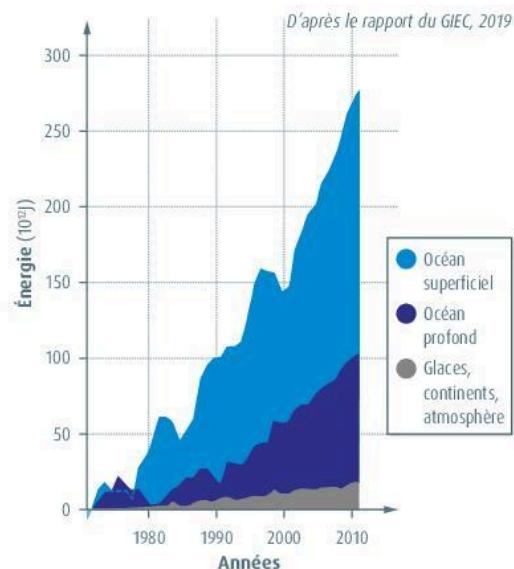
montrent que les couches superficielles (les 300-500 premiers mètres) mais aussi les couches profondes de l'océan se réchauffent, notamment au niveau des hautes latitudes. Ce stockage d'énergie thermique a de nombreuses conséquences, par exemple sur la montée des eaux (l'océan se réchauffant se dilate et donc son volume augmente) et sur la circulation des courants océaniques. Comme l'océan est doté d'une inertie thermique importante et d'une dynamique plus lente que l'atmosphère, il mémorise plus longtemps les perturbations qui l'affectent. Ainsi, l'accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles.

DOC 3 L'océan, acteur climatique fondamental.



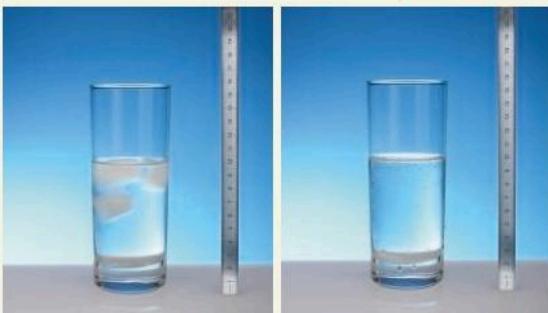
Graphique interactif

DOC 4 Évolution du niveau des océans depuis 1880. Les variations sont calculées par rapport à la moyenne du niveau des océans entre 1993 et 2008.



DOC 2 Évolution de la quantité cumulée d'énergie thermique stockée dans les océans et dans les continents depuis 1970.

Modélisation de la fonte de la banquise



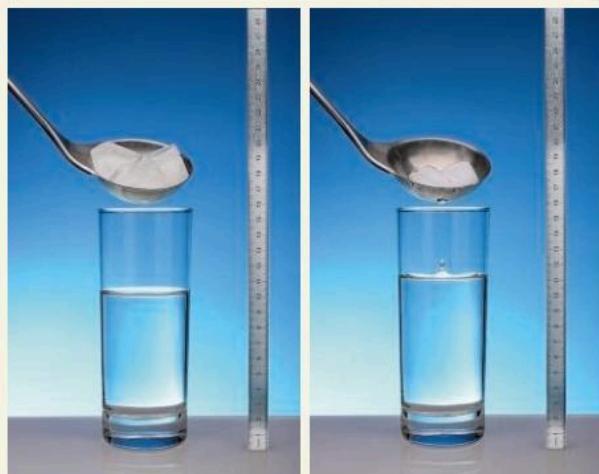
EXPÉRIMENTATION

Placer 2 ou 3 glaçons dans un verre vide.

- Remplir le verre avec de l'eau jusqu'à ras bord.
- Laisser fondre les glaçons et observer.

DOC 5 Modélisation des conséquences de la fonte de la glace océanique (banquise de l'océan Arctique) sur le niveau des océans.

Modélisation de la fonte des glaciers

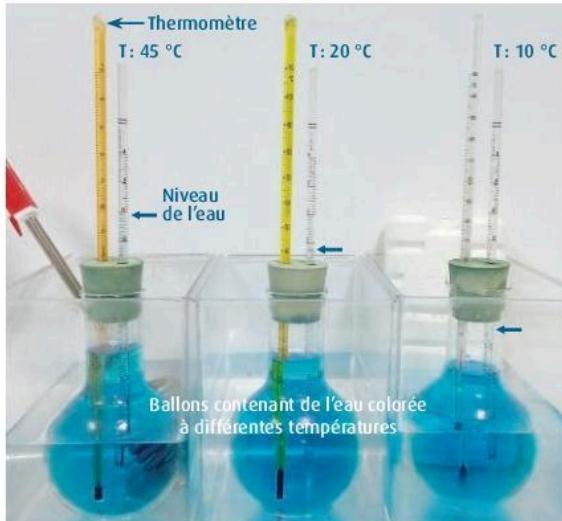

DOC 6 Modélisation des conséquences de la fonte de la glace continentale (Antarctique, Groenland, etc.) sur le niveau des océans.

Lorsqu'un corps de volume V_0 subit un changement de température ΔT , on peut calculer la variation de son volume, notée ΔV grâce à la relation:

$$\Delta V = \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T.$$

α est le coefficient de dilatation thermique du corps, en $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

C'est un coefficient qui dépend surtout du matériau qui compose le volume V_0 .


DOC 7 La dilatation thermique de l'eau.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

1. Rédigez un court paragraphe pour montrer le rôle de l'océan vis-à-vis du climat (**DOCS 1 à 4**).
2. Expliquez l'affirmation suivante: «Contrairement à une idée répandue, la fonte des glaces au Pôle Nord ne participe pas directement à la montée du niveau des océans. Mais elle y contribue indirectement, car elle induit une accélération de la fonte des glaces continentales.» (**DOCS 5 et 6**).
3. Retrouvez par le calcul l'affirmation suivante: «Les chercheurs estiment que la hausse du niveau des océans due à la dilatation thermique au xx^e siècle est de + 6 cm environ» (**DOCS 7 et 8**).
4. Calculez l'augmentation de la hauteur des océans due à la dilatation thermique si la température océanique augmente de 3 °C d'ici la fin du xx^e siècle.

Au cours du xx^e siècle, la température moyenne du globe a augmenté de +0,6 °C. La surface totale des océans est estimée à $360 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. On peut considérer que seule la couche superficielle océanique, qui s'étend de la surface de l'océan jusqu'à 1000 mètres de profondeur environ, a subi ces changements de température. Dans la plage de températures considérées, (autour de +10 °C en moyenne pour la couche superficielle), le coefficient de dilatation thermique de l'eau est $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

DOC 8 Quelques données concernant les océans de la planète Terre.

ESPRIT CRITIQUE

D'après l'agence américaine NOAA (National oceanic and atmospheric administration), le niveau des océans a augmenté à un rythme de 1,7 mm par an au cours du xx^e siècle. Ce taux a quasiment doublé depuis 1993 (environ 3,1 mm par an).

→ Quelles sont les conséquences actuelles de la montée du niveau des océans pour les populations humaines ?

Pistes de travail ► Recherche Internet

BILAN

LA COMPLEXITÉ DU SYSTÈME CLIMATIQUE



1. Le climat et sa variabilité

- ▶ La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques à court terme (jours, semaines) sur une région donnée alors que la climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires). Un climat est ainsi défini par les moyennes des **grandeur atmosphérique**s observées dans une région donnée pendant une période donnée. > [Unité 1](#)
- ▶ La température moyenne de la Terre correspond à une moyenne spatiale et temporelle de millions de données collectées dans le monde par des stations météorologiques et des mesures par satellites. D'autres indicateurs permettent l'étude du climat : volume des océans, étendue des glaces et glaciers, etc. Les variations de climat ont des conséquences sur de nombreux phénomènes à la surface du globe. Si ces phénomènes ont lieu dans le passé et laissent des indices observables aujourd'hui, ces indices deviennent des **indicateurs des climats** du passé. C'est le cas de pollens enfouis dans les sédiments ou de traces laissées dans les paysages par des glaciers anciens. > [Unité 2](#)

2. Le changement climatique actuel

- ▶ Depuis 150 ans, on observe un réchauffement climatique global : augmentation de la température moyenne du globe de +1 °C environ, fonte des glaces, évolution de la date des récoltes, etc. Ce réchauffement est la réponse du système climatique à un forçage radiatif positif. Le **forçage radiatif** augmente à cause des émissions de **gaz à effet de serre** (GES) dans l'atmosphère. Ainsi, depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration en CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement. > [Unité 3](#)
- ▶ Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre. Il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par le sol de la part de l'atmosphère, ce qui entraîne une perturbation de l'**équilibre radiatif** qui existait à l'ère préindustrielle. L'énergie supplémentaire est essentiellement stockée par les océans, mais aussi par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne du globe. > [Unités 3 et 5](#)

3. Des rétroactions sur le climat

- ▶ Les **rétroactions** positives amplifient l'augmentation de la température moyenne. C'est le cas de l'augmentation de la concentration de vapeur d'eau (GES) dans l'atmosphère, de la fonte des glaces qui diminue l'albédo et du dégel partiel du **pergélisol** qui libère des GES dans l'atmosphère. Les rétroactions négatives, au contraire, amortissent l'augmentation du forçage radiatif. Ainsi, davantage de CO₂ atmosphérique favorise la végétalisation, puits de carbone à court terme. L'augmentation de la couverture nuageuse due à l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique augmente l'albédo et diminue ainsi le forçage radiatif. > [Unité 4](#)
- ▶ L'océan a un rôle amortisseur fondamental en absorbant à sa surface une fraction très importante de l'énergie supplémentaire due au forçage radiatif positif. Par la **dilatation thermique** de l'eau, l'élévation de température en surface des océans conduit à une élévation du niveau océanique. À ce phénomène s'ajoute la fonte des glaces continentales qui contribue aussi très fortement à la montée des eaux. L'accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à l'échelle de plusieurs siècles. > [Unité 5](#)

Les mots-clés du chapitre

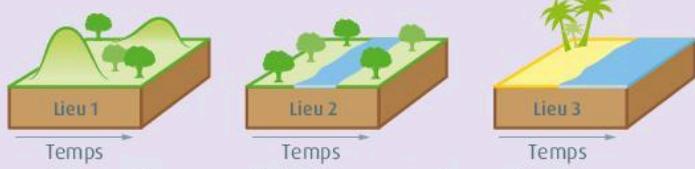
- **Grandeur atmosphérique** : Principalement la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité (couverture nuageuse), la vitesse et la direction des vents.
- **Indicateur du climat** : Indice observable et mesurable qui donne des indications sur les climats passés ou actuels.
- **Forçage radiatif** : Différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative renvoyée vers l'espace par la planète
- **Gaz à effet de serre (GES)** : Gaz atmosphérique qui absorbe des longueurs d'onde de l'infra-rouge émises par la surface terrestre à cause de sa température. Les GES principaux de l'atmosphère sont : CO₂, CH₄, N₂O et vapeur d'eau.
- **Équilibre radiatif** : Équilibre atteint lorsque la puissance reçue par la surface de la Terre équivaut à celle qu'elle émet.
- **Rétroaction** : Action en retour d'un phénomène sur la perturbation initiale qui l'a engendré.
- **Pergélisol** : Sol qui reste gelé en permanence. On le trouve dans les hautes latitudes (Sibérie, Alaska...) ou dans certaines hautes altitudes.
- **Dilatation thermique** : Une masse d'eau occupe plus de volume lorsque sa température augmente. Ce phénomène contribue à la montée du niveau océanique, tout comme la fusion des glaces continentales.

À noter

- Le **pergélisol** est parfois aussi appelé **permafrost** (terme anglais).

l'essentiel par l'image**Schéma interactif** **Météorologie et climatologie****Météorologie**

- Température
 - Pluviométrie
 - Vitesse du vent
- Prévisions à court terme

**Climatologie**

Moyenne spatiale et temporelle de grandeurs atmosphériques pendant un temps donné = climat

L'évolution du climat

- Indicateurs climatiques anciens ⇒ variabilité naturelle du climat
- Le réchauffement climatique actuel

Gaz à effet de serre (GES) et forçage radiatif

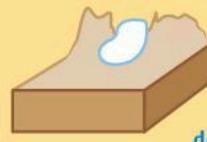
Puissance radiative absorbée par le sol

Puissance radiative émise par le sol et l'atmosphère

ATMOSPHÈRE

TERRE

FORÇAGE RADIATIF POSITIF

Exemples de rétroactions

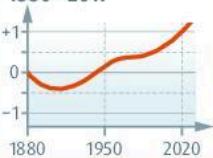
Rétroaction positive

↓ albédo

entraine

entraine

Température moyenne globale : écart par rapport à la moyenne 1880–2017



Rétroaction négative

entraine

entraine

absorption CO₂

entraine

entraine

entraine

entraine

Augmentation de la végétalisation

Le rôle des océans**Stockage de l'apport d'énergie additionnel**

Continent



Augmentation de la température des océans

Fonte des glaciers continentaux

Dilatation thermique

Augmentation du niveau océanique

Mémoriser son cours

Exercices corrigés



Pour mémoriser l'essentiel du cours, posez-vous régulièrement ces questions et vérifiez vos réponses.

1. Quelle est la différence entre météorologie et climatologie?
2. Quelles données permettent l'étude du climat actuel?
3. Comment peut-on reconstituer les climats du passé?
4. Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre et quelle est son action sur le forçage radiatif?
5. Citez une rétroaction positive et une rétroaction négative agissant sur le forçage radiatif. Quelles sont les conséquences de chacune de ces rétroactions sur la température moyenne de la Terre?
6. Quels sont les deux facteurs principaux responsables de la montée du niveau des océans?

Pour s'échauffer

Exercices interactifs corrigés



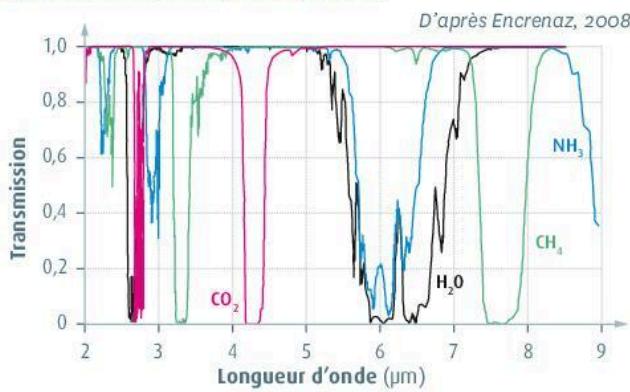
1 QCM

Pour chaque proposition, identifiez la (ou les) bonne(s) réponse(s).

1. La météorologie:

- a. repose sur la moyenne de données climatiques.
- b. s'intéresse au temps qu'il fait et la climatologie au temps qu'il fera.
- c. étudie les phénomènes atmosphériques à court terme, à un endroit donné.
- d. permet de prévoir le temps qu'il fera dans un siècle.

2. Le spectre ci-dessous montre l'absorption de quelques gaz dans les infrarouges. Il permet:



- a. conclure si ces gaz sont des GES.

- b. montrer que le sol émet entre 1 et 10 μm.
- c. démontrer la pollution de l'air.
- d. montrer que le CO₂ absorbe entre 4 et 5.

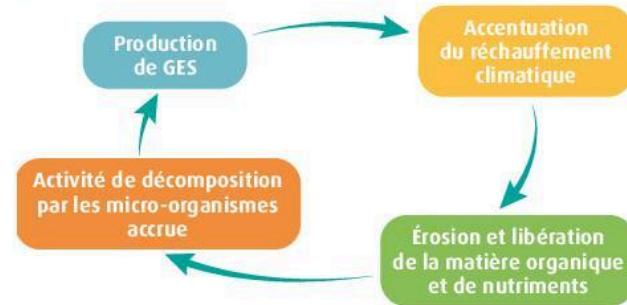
3. La climatologie:

- a. repose sur l'utilisation de moyennes spatiale et temporelle.
- b. permet de faire des prévisions sur le temps qu'il fera dans la semaine à venir.
- c. étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme.

4. Un forçage radiatif positif peut être causé par:

- a. une diminution des GES atmosphériques.
- b. une diminution de l'albédo.
- c. une augmentation du niveau des océans.
- d. une augmentation de l'albédo.

5. Ce schéma de rétroaction correspond à:



- a. la combustion des ressources fossiles.
- b. la fonte de la glace océanique au Pôle Nord.
- c. la fonte du pergélisol au Canada et en Sibérie.

6. La montée du niveau moyen des océans est causée notamment par:

- a. la fonte de la banquise (glace océanique) au Pôle Nord.
- b. le phénomène de dilatation thermique.
- c. la végétalisation de la forêt amazonienne.
- d. l'apport d'eau par la fonte des glaces continentales.

7. La vapeur d'eau dans l'atmosphère :

- a. n'influence pas le forçage radiatif.
- b. est impliquée dans des rétroactions positives et négatives.
- c. est impliquée dans une rétraction négative uniquement.
- d. est impliquées dans une rétroaction positive uniquement.

2 Vrai/faux

Identifiez les bonnes réponses et corrigez les fausses

1. Il est possible d'étudier les climats du passé en reconstituant à partir de pollens la végétation aux différentes époques.
2. Le diazote, composant principal de l'atmosphère, est un gaz à effet de serre.
3. Depuis plusieurs centaines de milliers d'années, la concentration en CO_2 atmosphérique n'a jamais augmenté aussi rapidement qu'actuellement.
4. Les dates des vendanges ou les reculs des glaciers sont des indicateurs météorologiques et non des indicateurs de la variabilité récente du climat.
5. Les données de température à la surface du globe proviennent uniquement des mesures par satellites.
6. La fonte des glaces océaniques est le principal facteur responsable de la montée du niveau des océans.

3 Qui suis-je ?

1. Une discipline scientifique qui étudie les phénomènes atmosphériques sur de courtes échelles de temps et d'espace.
2. Une discipline scientifique qui prévoit le temps qu'il fait en un lieu donné à l'échelle d'une semaine.
3. Un facteur responsable de la montée du niveau des océans.
4. Une grandeur calculée permettant d'avoir une vision synthétique de la température qu'il fait dans un pays sur un an.
5. L'action en retour d'un phénomène sur la perturbation qui l'a affecté.

4 Rédiger une phrase

Rédigez une phrase avec les mots suivants.

1. Rayonnement thermique infrarouge, GES atmosphérique, équilibre radiatif, perturbation.
2. Forçage radiatif positif, océan, rôle amortisseur, stockage, surplus d'énergie.
3. Température, pression, degré d'hydrométrie, moyennes, grandeurs atmosphériques, climat.
4. Climatologie, court terme, météorologie, grandeurs atmosphériques, moyen ou long terme.

5 Questions à réponses courtes

1. En utilisant un vocabulaire scientifique approprié, expliquez ce qui permet de dire: «Il fait plus chaud à Marseille qu'à Paris.»
2. Expliquez la phrase: «Le climat c'est que vous attendez, la météo c'est ce que vous avez.»
3. L'augmentation de la végétalisation due à une augmentation de CO_2 atmosphérique constitue-t-elle une boucle de rétroaction positive ou négative sur le forçage radiatif?
4. La fonte des glaces liée à l'augmentation de température moyenne entraîne-t-elle une augmentation ou une diminution de l'albédo?
5. Quels sont les deux phénomènes principalement responsables de la montée du niveau océanique?

6 Boucle de rétroaction

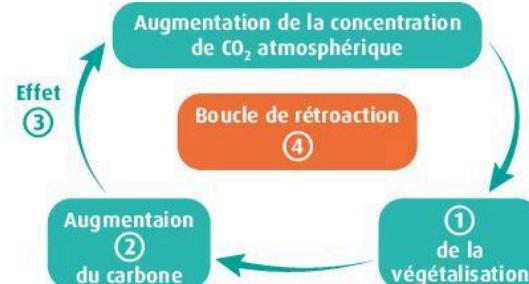
Remplacez les numéros par une des propositions.



1. Augmentation / Diminution
2. Augmentation / Diminution
3. Augmentation / Diminution
4. Amortissante / Amplificatrice
5. Positive / Négative

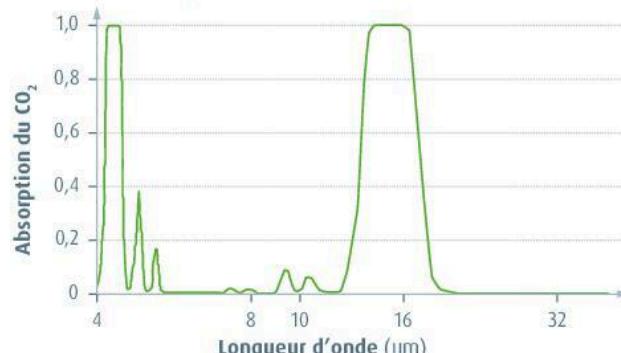
7 Schématiser des rétroactions

Remplacez les numéros par une des propositions.



1. Augmentation / Diminution
2. Du stockage / De la libération
3. Amortissant / Amplificateur
4. Positive / Négative

8 Lire un spectre d'absorption



D'après www.lmd.jussieu.fr

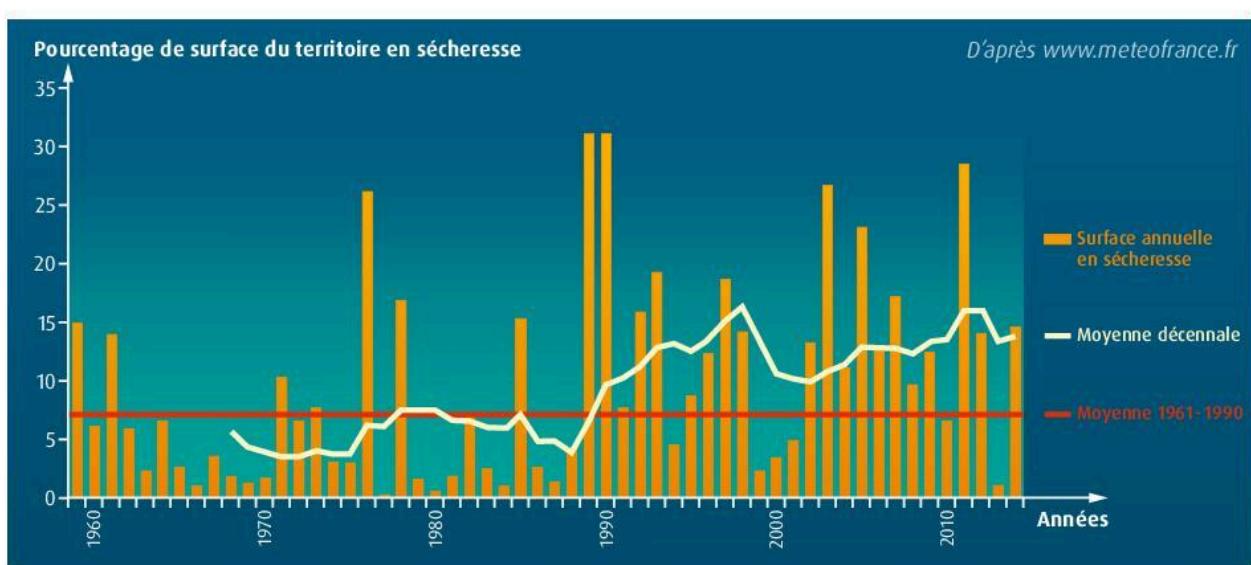
Spectre d'absorption du CO_2

1. Quelle(s) longueur(s) d'onde(s) correspondent au maximum d'absorption de CO_2 .
2. Sachant que le sol terrestre émet des infrarouges entre 10 et 20 μm , justifiez pourquoi le CO_2 est considéré comme un gaz à effet de serre.

Exercice résolu Méthode**9 Lire un graphique****La surface touchée par la sécheresse en France**

Une part importante de la surface de France métropolitaine est régulièrement touchée par la sécheresse. Le graphique ci-dessous représente la surface annuelle concernée entre 1959 et 2014. En plus de la surface annuelle touchée par la sécheresse, ce graphique présente une moyenne sur la période 1961 – 1990 et une moyenne décennale dite « glissante » (en 1969 on représente la moyenne de la période 1959 – 1969, en 1970 la moyenne 1960 – 1970, etc.).

J'identifie sur le graphique les courbes correspondant aux éléments mentionnés dans l'énoncé.

**QUESTIONS**

1. En ne considérant que les surfaces concernées annuellement (pas les moyennes) décrivez le graphique.
2. Qu'apporte comme information la moyenne 1961-1990 ?
3. Pourquoi le calcul d'une moyenne sur 10 ans a-t-il été nécessaire ? Décrivez son évolution.

Est-ce que cette moyenne est représentative de l'ensemble des valeurs annuelles ?

RÉSOLUTION

1. Avant 1989, sur 30 ans donc, la surface annuelle de la France touchée par la sécheresse ne dépasse que deux fois les 15 % en 1976 et en 1978. Après 1989 ce seuil est dépassé à neuf reprises en 25 ans. Il semble donc que la surface concernée par les sécheresses est généralement plus importante.

Pour décrire un graphique présentant des variations importantes où les tendances ne sont pas clairement lisibles, je peux regarder le nombre de valeurs dépassant un certain seuil (à la hausse ou la baisse) ou encore dénombrer et quantifier les valeurs extrêmes.

2. Cette moyenne qui couvre la première partie de la période (1961-1990) ne semble pas représentative de la deuxième partie (1990-2014) car on constate que pour 20 années sur 24, la surface concernée dépasse la moyenne, parfois de façon considérable (1989, 1990, 2003, 2005, 2011).

3. Le calcul d'une moyenne sur 10 ans permet de visualiser une tendance générale peu influencée par les variations d'une année à l'autre. On constate que cette moyenne annuelle est passée d'environ 5-6 % à environ 15 % en un peu plus de 25 ans.

Je pense à quantifier mes observations.

Exercices d'application

Méthode

10 Lire un graphique

La température moyenne en janvier à Lille



DOC 1 Température moyenne mensuelle en janvier à Lille.

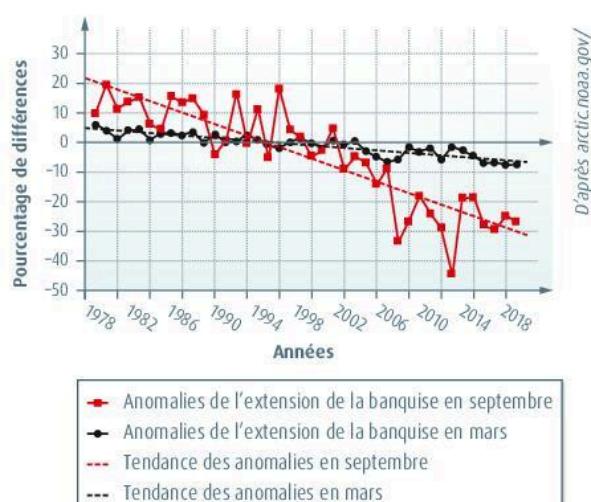
QUESTIONS

1. Décrivez la courbe des températures moyennes mensuelles.
2. Relevez les températures moyennes mensuelles les plus hautes et les plus basses mesurées à Lille au mois de janvier sur la période 1973-1995. Puis sur la période 1995-2020. Que constatez-vous?
3. Pouvez-vous en déduire une tendance à la hausse ou à la baisse des températures moyennes à Lille? Quelle grandeur serait utile pour visualiser une tendance générale?

AIDE

1. Je rappelle ce que représente la courbe. Je décris l'allure générale de la courbe et la valeur moyenne autour de laquelle les valeurs relevées fluctuent. J'indique les valeurs extrêmes atteintes.
2. J'utilise le vocabulaire adapté pour comparer des valeurs (« plus/moins élevé que » etc.). Je quantifie mes comparaisons.
3. Attention : le graphique représente les valeurs seulement au mois de janvier.

11 Lire un graphique



DOC 1 Évolution de l'extension des glaces de mer en Arctique.

L'extension de la banquise

Le graphique représente les anomalies d'extension de la banquise en Arctique aux mois de septembre, mois du maximum d'extension de la banquise, et aux mois de mars, mois du minimum d'extension de la banquise, entre 1978 et 2018. Les anomalies sont calculées par rapport à une valeur de référence, la moyenne d'extension entre 1981 et 2010, correspondant au 0 %. Les droites en pointillés sont les droites de régression modélisant les tendances générales de l'évolution des anomalies.

QUESTIONS

1. Justifiez le choix des mois de mars et de septembre dans la représentation graphique.
2. Décrivez l'évolution de l'extension des glaces de mer présentée par les deux courbes.
3. En quantifiant votre réponse, indiquez l'information apportée par les droites de régression.

Tester ses compétences

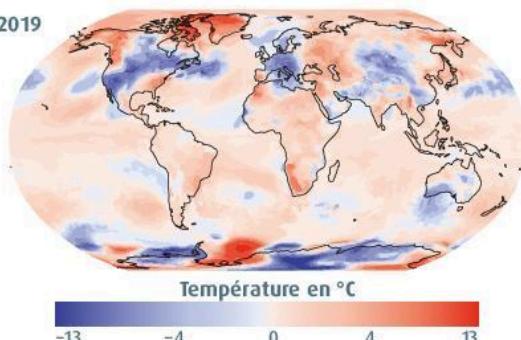
12 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Vague de froid et changement climatique

« De fait, les vagues de froid observées localement [en France] ce printemps ne remettent pas en cause le réchauffement climatique global de la planète. Du 1^{er} au 16 mai, les températures relevées en France ont été en moyenne 1,7 °C inférieures aux normales de saison. La matinée du 6 mai a même été la plus froide à cette période depuis quarante ans. Pas de quoi s'inquiéter d'un réchauffement, donc ? Sauf qu'à l'échelle mondiale, le 6 mai, il faisait globalement 0,7 °C de plus que la moyenne des températures enregistrées entre 1979 et 2000. »

DOC1 Extrait du journal *Le Monde*, 29 mai 2019.

MAI 2019



D'après NCEP-NCAR, 2019

DOC2 Anomalie de température dans le monde en mai 2019 par rapport à la moyenne 1981-2010.

QUESTION

Rédigez un texte expliquant qu'une période de froid exceptionnelle en France ne remet pas en cause l'existence d'un changement climatique.

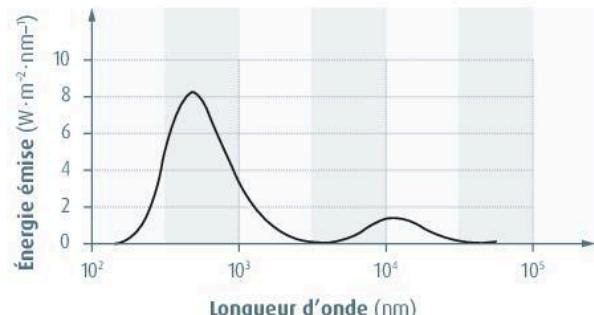
Vous appuerez votre réponse sur les documents et sur la donnée suivante : la France représente 0,4 % des terres émergées de la surface de la terre et 0,1 % de la surface totale du globe.

AIDE

- Je relève les données en France et dans le reste du monde.
- Je réfléchis à la notion de moyennes spatiale et temporelle pour définir un climat.

13 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Étude de l'ozone atmosphérique



DOC1 Allure simplifiée du spectre d'émission de la planète Terre vue d'un satellite.



DOC2 Spectre infrarouge de l'ozone gazeux (O_3) en transmittance.

QUESTIONS

- Sur le **DOC. 1**, identifiez la partie du spectre correspondant à l'albédo de la planète (réflexion de l'énergie solaire) et la partie correspondant à son émission thermique dans les infrarouges.
- Rédigez un court paragraphe argumenté et chiffré indiquant si l'ozone est un GES ou non.

AIDE

- Plus la transmittance est élevée, moins le composé chimique absorbe les longueurs d'onde incidentes, et inversement.

14 Exploiter des documents, réaliser un schéma

Les rétroactions de la végétation sur le climat

Voici une diapositive extraite d'une conférence scientifique d'un climatologue sur les rétroactions en jeu dans le système climatique.

Note : ka = kilo-année = 1 000 ans, e.g. = exempli gratia = par exemple, T_s = température moyenne du sol.

QUESTIONS

1. Représentez sous forme de schémas en boucle les trois mécanismes de rétroaction mentionnés.
2. Commentez la phrase : «Une même cause peut avoir des effets contraires selon sa localisation.»
3. Précisez l'expression «effet fertilisant du CO₂», et rappelez dans laquelle des trois boucles cet effet est impliqué.

Retroactions climat-végétation biogéochimiques

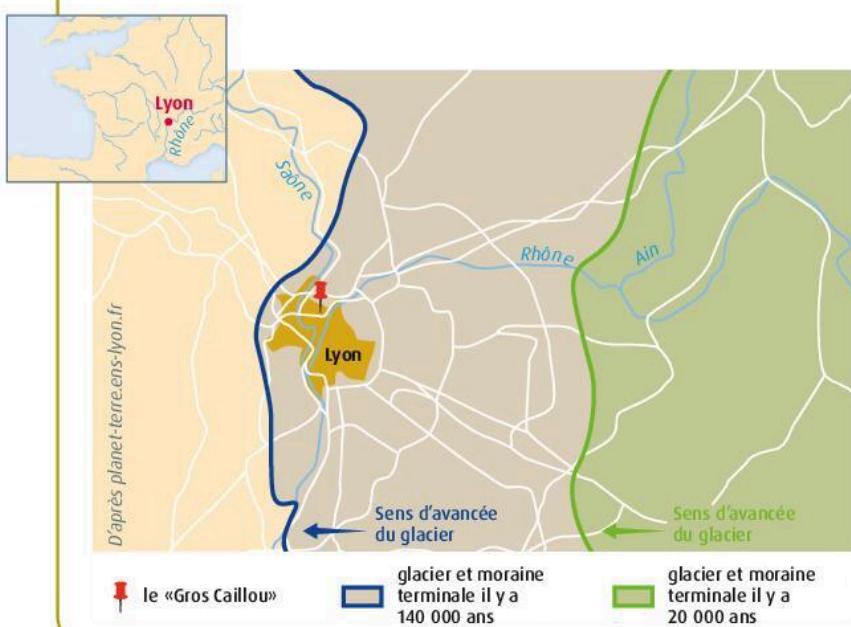
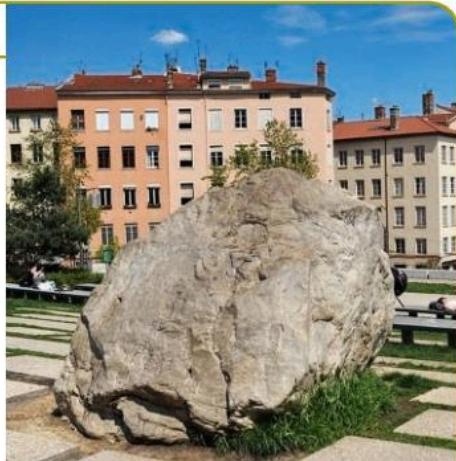
- Aux échelles < ka, multiples rétroactions climat-végétation via des modifications du puits du carbone continental :
 - rétroaction négative là où la végétation est limitée par la température (e.g. hautes latitudes). $T_s \nearrow \Rightarrow \text{plantes} \nearrow \Rightarrow \text{puits de carbone} \nearrow$.
 - rétroaction positive là où la végétation est limitée par la ressource en eau (e.g. basses latitudes). $T_s \nearrow \Rightarrow \text{ressource en eau} \searrow \Rightarrow \text{plantes} \searrow \Rightarrow \text{puits de carbone} \searrow$.
 - rétroaction positive via les feux de forêts. $T_s \nearrow \Rightarrow \text{feux} \nearrow \Rightarrow \text{CO}_2 \nearrow$.
 - Au total, dans les conditions actuelles, on* estime qu'un climat plus chaud diminuerait le puits de carbone continental (rétroaction positive).
- * IPCC AR5 (2013), Chapter 6.
- N.B. Effets climatiques modulés par effets physiologiques, e.g. effet fertilisant du CO₂ (photosynthèse plus efficace).

Source : Julien Cattiaux, CNRS, Météo-France

15 Exploiter des documents, formuler des hypothèses

Le gros caillou à Lyon

En haut de la colline de la Croix-Rousse, dans la ville de Lyon, trône un rocher de grande taille dont la composition minéralogique indique qu'il est probablement originaire d'environ 175 km à l'est de Lyon dans les Alpes (vallée de la Haute Maurienne ou de la Haute Tarentaise). On qualifie ces rochers de blocs erratiques, ils sont relativement fréquents. Le reste de la colline est composé d'une moraine glaciaire correspondant au front d'un glacier (ou avancement maximal) dont on peut retracer le contour (DOC. 1).



DOC 1 Extension du glacier il y a 140 000 et 20 000 ans.

QUESTIONS

1. Indiquez à quelle période l'extension du glacier a été la plus importante.
2. Proposez une hypothèse pour expliquer la présence du gros caillou à cet endroit. Datez cet événement.
3. Concluez sur le climat global probable à ces deux époques. À l'aide d'une recherche internet, déterminez le nom des deux périodes glaciaires correspondantes.

16 Exploiter des documents, effectuer des calculs**Élévation du niveau océanique**

Les principaux contributeurs à la montée des océans sont la dilatation de l'eau sous l'effet de l'augmentation de température et l'apport de la fonte des glaces continentales, comme les glaciers par exemple. La contribution de ces deux facteurs se modifie au cours du temps.



D'après www.climate.gov (NOAA)

DOC 1 L'augmentation du niveau moyen des océans entre 1996 et 2018.

Deux raisons principales expliquent la montée du niveau océanique : la fonte des glaces continentales ajoute de l'eau à l'océan et le volume de l'océan augmente lorsque l'eau se réchauffe.

Depuis les années 1970 jusqu'à la dernière décennie, la fonte des glaciers et la dilatation thermique contribuaient de façon quasi-équivalente à la montée du niveau océanique. Cependant, sur la dernière décennie, la montée des océans due à la fonte des glaciers (qui s'est accélérée), vaut quasiment le double de la montée des eaux due à la dilatation thermique.

D'après www.climate.gov
(NOAA).

DOC 2 Traduction d'un extrait du site américain NOAA (National oceanic and atmospheric administration).

La surface totale des océans à la surface du globe est estimée à $360 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. On considère que seule la couche superficielle océanique, qui s'étend de la surface de l'océan jusqu'à 1000 m de profondeur environ, subit les changements de température. Si le volume total de l'océan (sur 1000 m de profondeur) appelé V_0 subit un changement de température ΔT , on peut calculer la variation de son volume, notée ΔV grâce à la relation :

$$\Delta V = \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

Avec: ΔT en $^{\circ}\text{C}$; ΔV et V_0 en m^3 .
 α , le coefficient de dilatation thermique de la couche superficielle océanique. $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

DOC 3 Variation de volume de l'océan en fonction de la température.

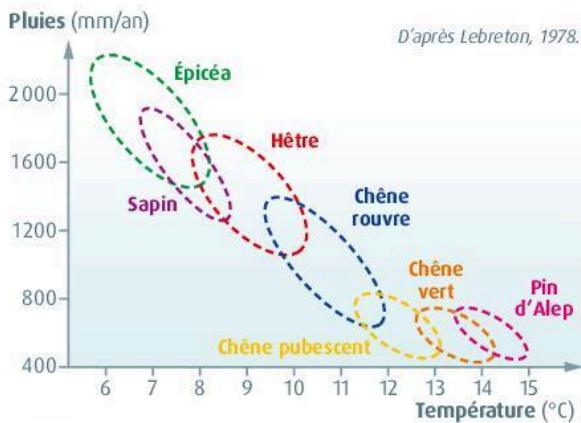
QUESTIONS

- À l'aide du **DOC. 1**, justifiez quantitativement le texte du **DOC. 2**.
- Indiquez de combien de cm de montée du niveau des océans la fusion des glaces continentales est responsable en 2018.
- Calculez quelle devrait être la hausse de température moyenne du globe pour que l'expansion thermique contribue à l'augmentation du niveau des mers de la même façon que la fonte des glaces en 2018.
- Calculez quelle serait l'augmentation du niveau des mers due à l'expansion thermique si la température moyenne du globe augmentait de $+5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Expliquez si ce résultat est suffisant pour conclure sur l'augmentation du niveau des océans dans l'hypothèse « $+5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de réchauffement climatique ».

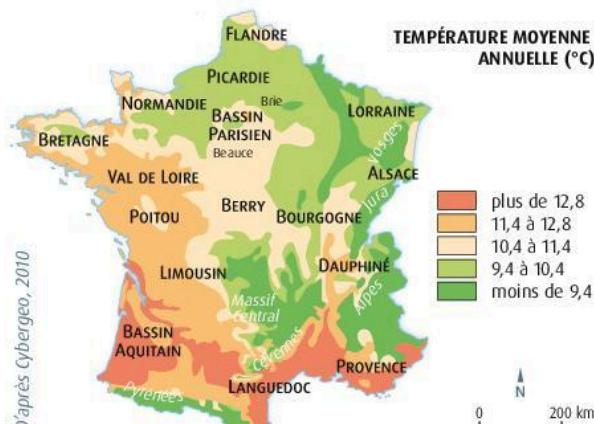
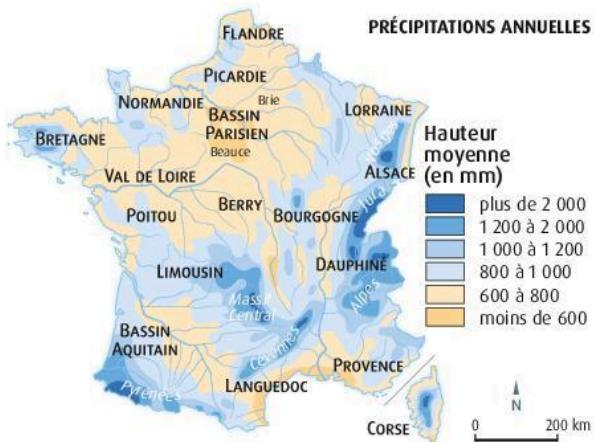
17 Mettre en relation des documents, formuler des hypothèses

Changement climatique et répartition des espèces

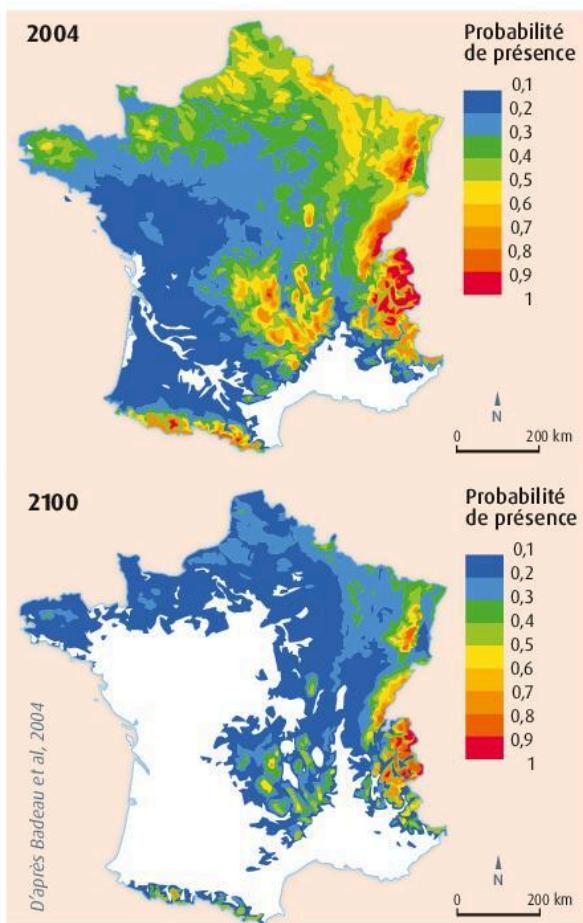
Les êtres vivants se répartissent à la surface du globe en fonction du climat. Les chercheurs en écologie se posent la question de savoir dans quelle mesure le changement climatique peut changer la répartition des espèces. On s'intéresse ici au cas des arbres dont le changement de répartition géographique est particulièrement lent (par rapport à des animaux qui peuvent se déplacer).



DOC 1 Représentation des préférences climatiques de quelques espèces d'arbres fréquentes en France. Les données climatiques sont représentées en moyenne annuelle : pluie en millimètres par an et température moyenne annuelle.



DOC 2 Précipitations et températures annuelles.



DOC 3 Modélisations de l'aire de répartition du hêtre en 2004 (en haut) et en 2100 (en bas). Une probabilité de présence de 1 indique qu'il est certain de trouver des hêtraies dans la région.

QUESTIONS

1. Décrivez les conditions climatiques dans lesquelles on peut trouver l'épicéa, le hêtre et le chêne vert (DOC. 1).
2. Expliquez en quoi la région des Alpes est actuellement plutôt propice à la présence du hêtre (DOCS 2 et 3).
3. Expliquez ce qui va changer dans la répartition du hêtre dans la région entre les Flandres et la Lorraine d'après ces modélisations (DOCS 2 et 3). Que pouvez-vous supposer quant au climat associé ?
4. Formulez une hypothèse sur les espèces d'arbres qui pourraient devenir plus abondantes sur le territoire métropolitain d'ici 2100 (DOCS 1 et 3).