

Chapitre SCS2 « La complexité du système climatique »

Liste des exposés

<i>Travail 1. Météorologie, climatologie et variations climatiques (documents 1 à 10).</i>	1
<i>Travail 2. Archives climatiques : les variations de température passées. Un exemple d'adaptation au réchauffement climatique : la vigne (documents 11 à 17).</i>	5
<i>Bilan classe. PIB, croissance économique et effet de serre (documents 18 et 19).</i>	8
<i>Travail 3. Les effets amplificateurs du changement climatique : l'exemple de la cryosphère (banquise, glace continentale, pergélisol). Documents 20 à 26 et document de référence.</i>	10
<i>Travail 4. Réchauffement climatique et océans. Réchauffement climatique et végétalisation (documents 28 à 36).</i>	14

Travail 1. Météorologie, climatologie et variations climatiques (documents 1 à 10).

Document 1. Le bulletin météorologique.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

La météorologie (du grec *meteos* « élevé dans les airs ») est une science qui étudie les phénomènes atmosphériques pour prévoir le temps qu'il fait dans l'immédiat (jour, semaine...). Des valeurs instantanées et locales de paramètres physiques (la température, les précipitations, la pression atmosphérique, la couverture nuageuse, la direction et la force des vents), permettent de définir la météo d'un lieu à un moment donné.

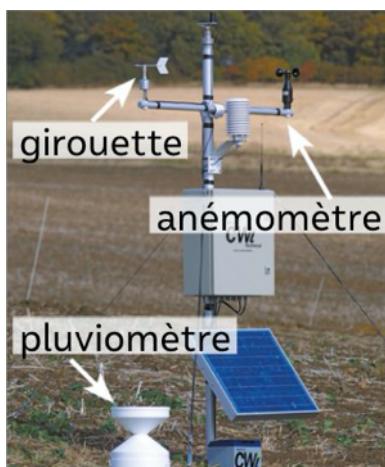
Chacun peut consulter ses conditions météo locales sur des sites de référence grâce aux stations météorologiques qui les enregistrent.

Document 2. Des outils pour mesurer les grandeurs atmosphériques.

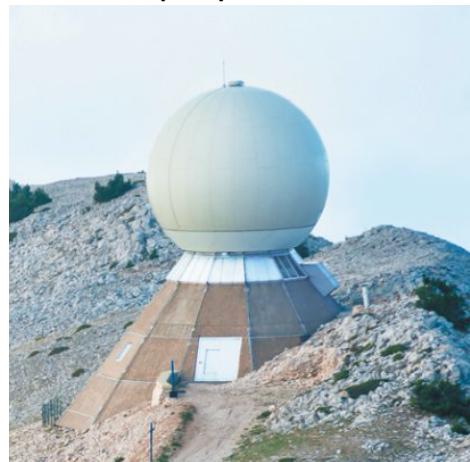
D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

De nombreux moyens d'observation permettent aux scientifiques de mesurer les grandeurs atmosphériques utilisées par les météorologues et les climatologues (température, pression, hygrométrie, pluviométrie, nébulosité, vitesse et direction des vents).

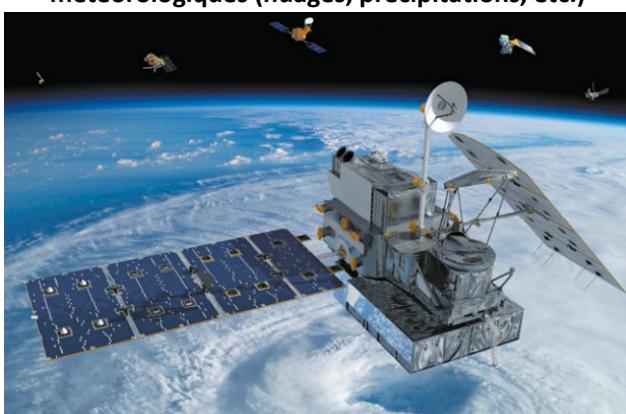
Station météorologique et ses capteurs



Radar météorologique utilisé pour repérer les précipitations



Satellite météorologique équipé de capteurs permettant d'identifier des phénomènes météorologiques (nuages, précipitations, etc.)



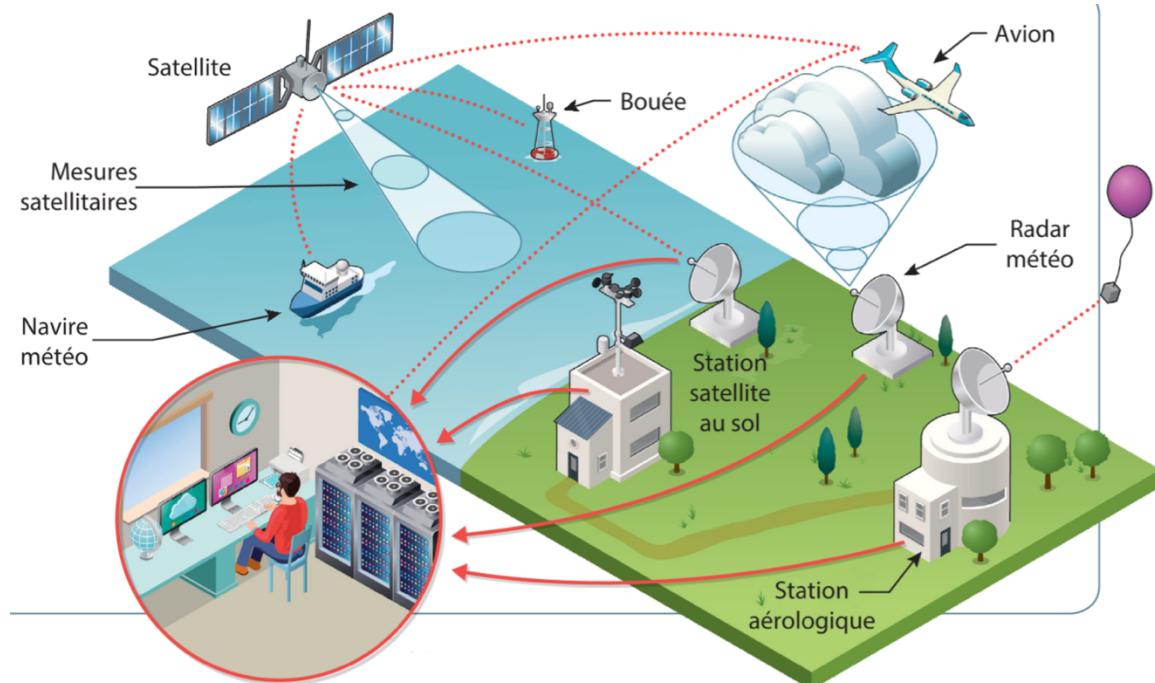
Radiosondage équipé de capteurs de pression, de température et d'humidité.



Document 3. Le devenir des données météorologiques.

D'après Enseignement scientifique terminale Belin 2024

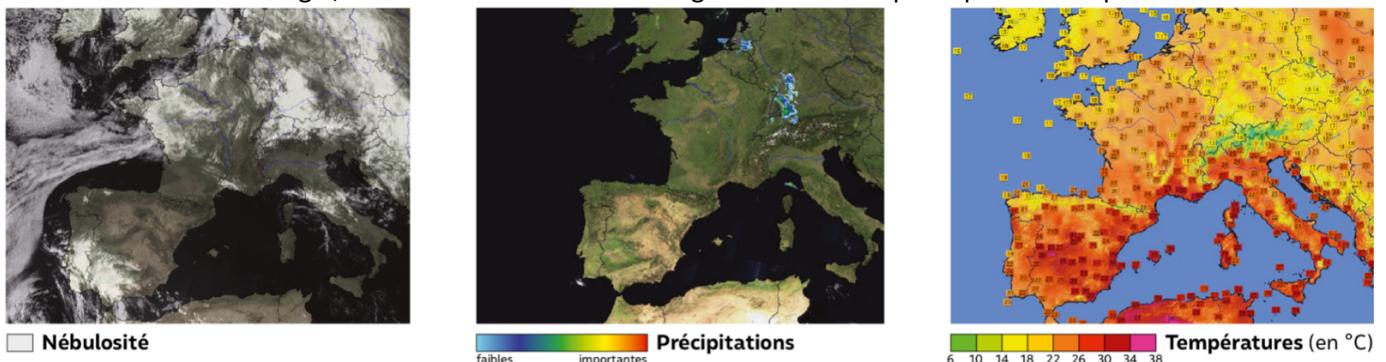
Les stations météorologiques situées à terre sont complétées par des bouées et des navires prenant des milliers de mesures quotidiennes sur tous les océans. Des sondes attachées à des ballons ou dans les avions de ligne permettent d'envoyer des données de différentes altitudes à des récepteurs situés 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.



Document 4. Mesures météorologiques le 12 juillet 2019 à 11h00.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

En météorologie, on mesure et on observe les grandeurs atmosphériques en temps réel.



Possibilité d'avoir de multiples autres cartes sur <https://www.infoclimat.fr> (conseillé).

Document 5. Supercalculateur de Météo France.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

Les météorologues, à l'aide de supercalculateurs, utilisent des simulations informatiques appelées « modèles de prévision numérique du temps » (PNT) pour établir les prévisions du temps qu'il fera dans les prochains jours, voire semaines. Pour simuler l'évolution du temps, les modèles PNT utilisent les grandeurs atmosphériques mesurées par les différents moyens d'observation et calculent leur évolution à partir des équations des lois de la physique.



Page possible pour aller plus loin : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/une-puissance-de-calculation-multipliee-par-10-millions-en-30-ans-pour> (consulté le 4/10/22).

Points sur lesquels insister.

- **Définir** la notion de météorologie.
- **Préciser** quels sont les paramètres mesurés et comment se font les mesures. **Utiliser** le site d'Infoclimat pour l'illustrer.
- **Indiquer** comment sont réalisées les prévisions (lien grandeurs mesurées / modélisation/ supercalculateur).

Document 6. Quand « climat » rime avec « moyennes ».

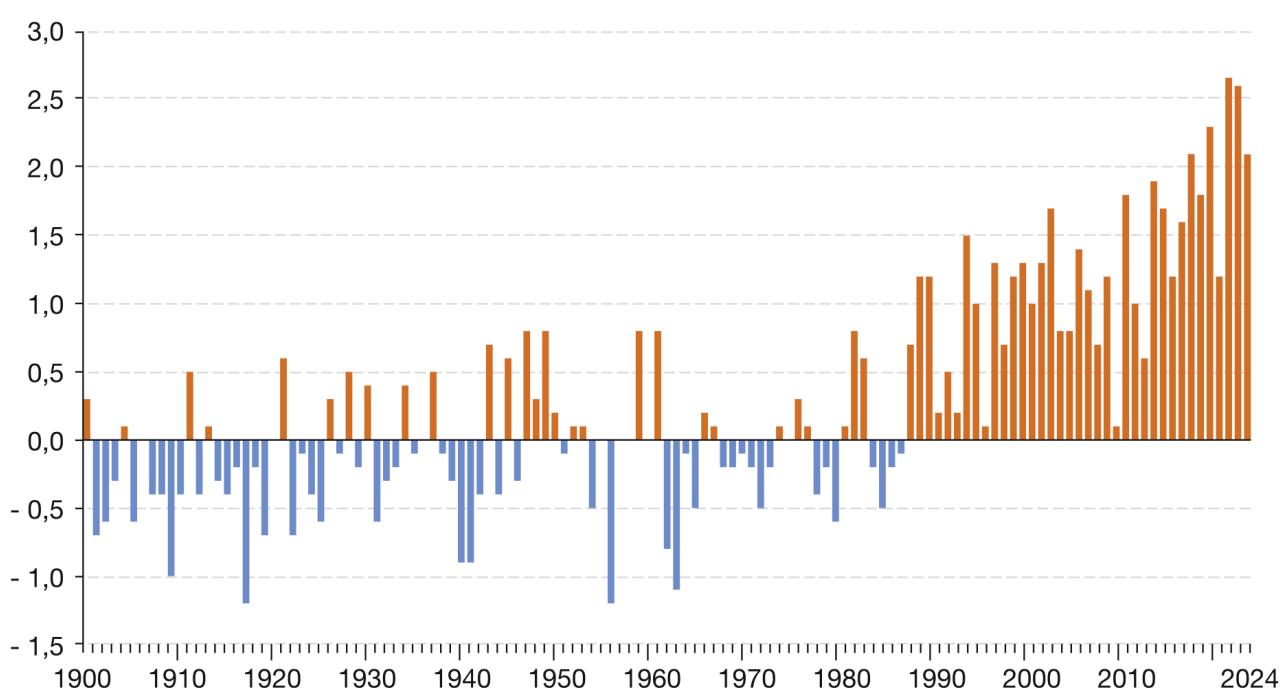
Un climat est défini comme la moyenne sur 30 ans des valeurs des paramètres météorologiques sur des zones géographiques plus ou moins étendues. Le climat actuel de la Terre est défini en **référence à des valeurs moyenne d'une période** (par exemple allant de 1961 à 1990).

Attention cependant, cette moyenne est valable pour les documents ci-dessous : en effet, en climatologie les moyennes glissent tous les dix ans. En 2022, la moyenne de référence est fondée sur la période 1991-2020.

Document 7. Écart des températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1900 (par rapport à la normale 1961-1990).

D'après Météo France 2025

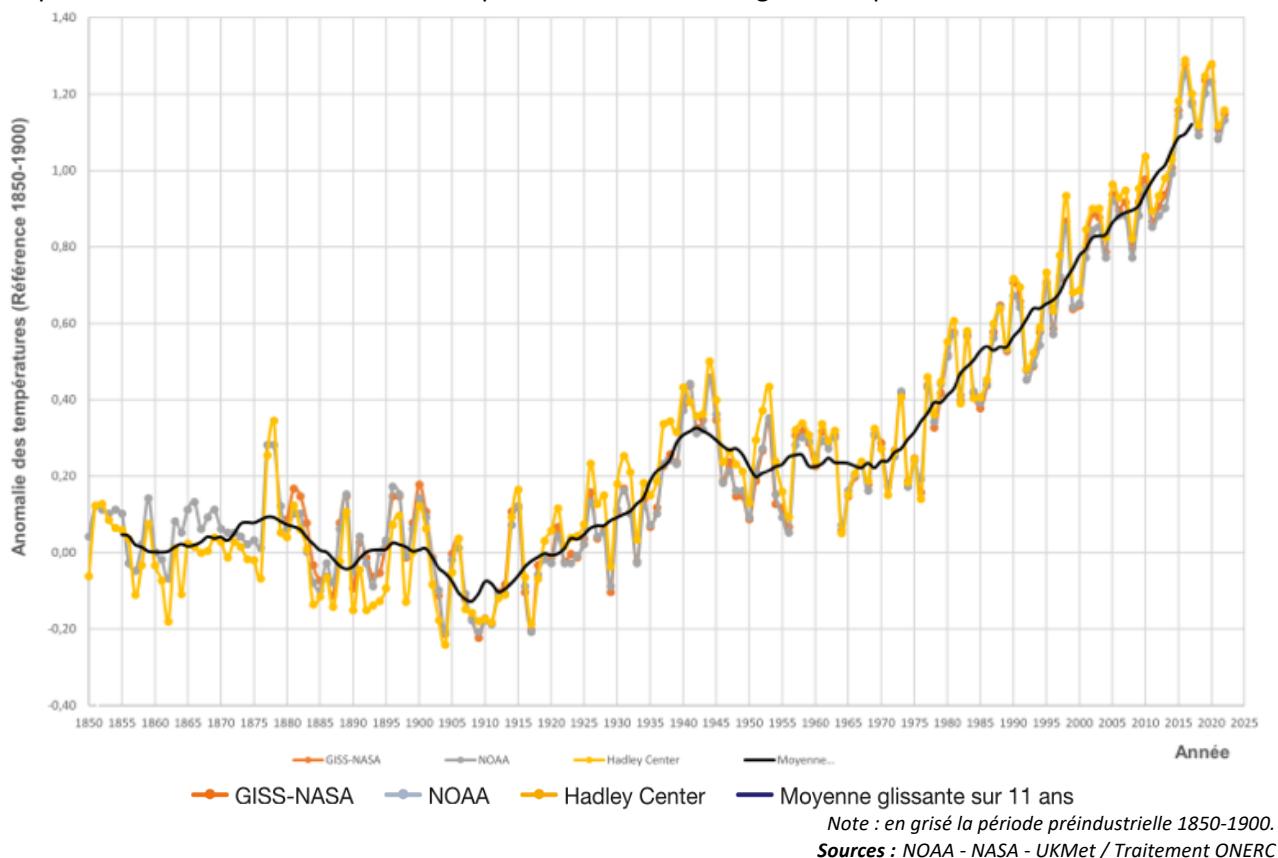
Écart par rapport à la normale 1961-1990, en °C



Document 8. Variations de température à l'échelle du globe depuis 1850 jusqu'en 2022.

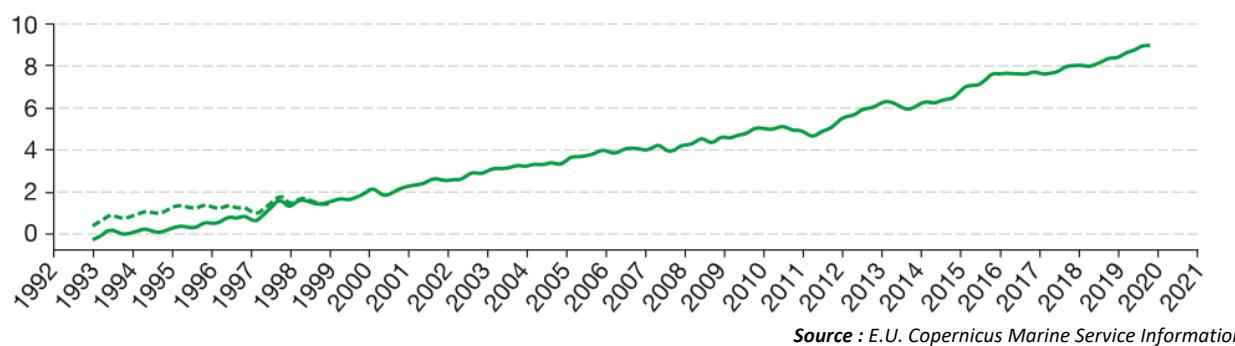
D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Les données de nombreuses stations météorologiques réparties sur la planète, les relevés de la température de la surface de la mer et les mesures effectuées par les stations de recherche en Antarctique ont permis d'établir les variations de température à l'échelle du globe sur près de 150 ans.

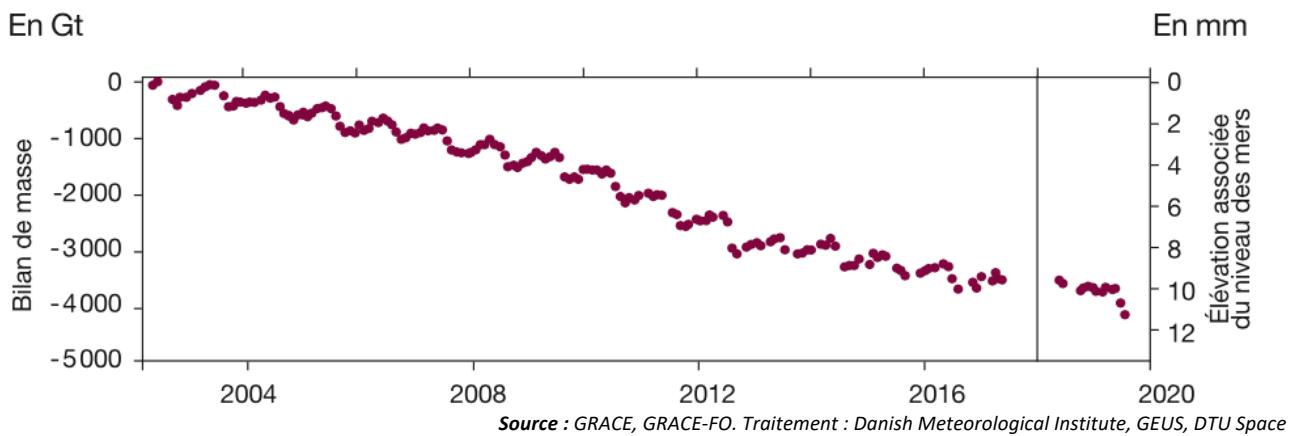


Document 9. Évolution du niveau mondial océanique entre 1992 et 2020.

En cm



Document 10. Bilan de masse des glaces du Groenland de 2002 à 2019.



Points sur lesquels insister.

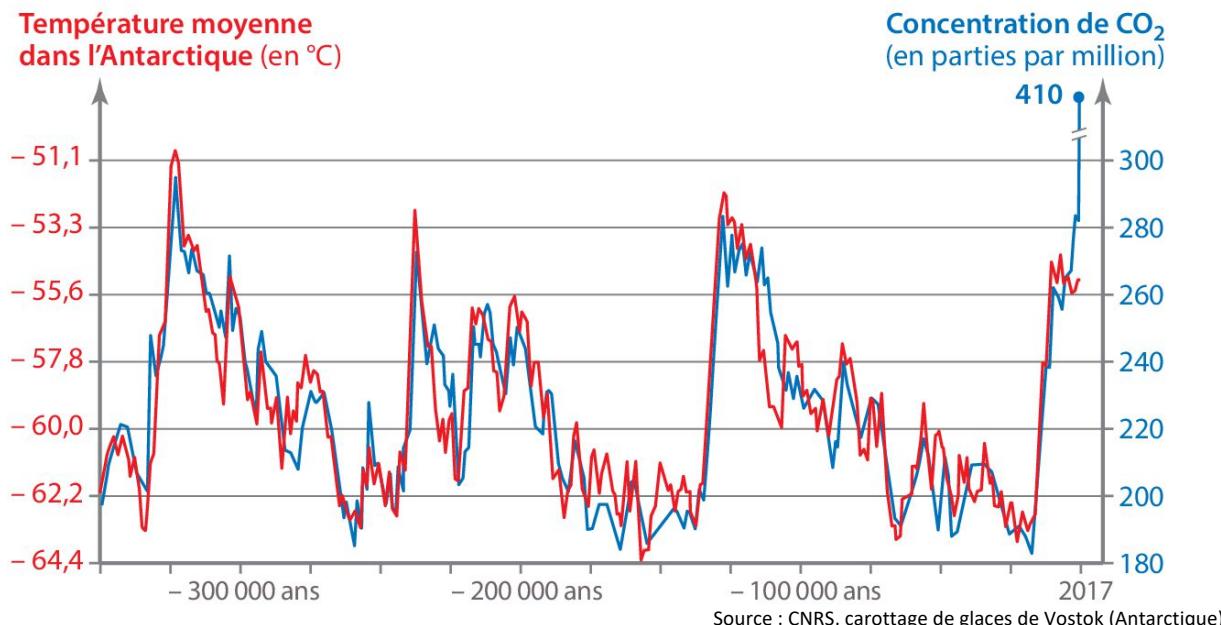
- Définir la notion de climatologie.
- Indiquer l'évolution des températures françaises depuis 1900, puis mondiales depuis 1850 (c'est juste un constat : aucune explication demandée).
- Indiquer les évolutions du niveau océanique et du bilan de masse des glaces du Groenland (constat seul là aussi).

Travail 2. Archives climatiques : les variations de température passées. Un exemple d'adaptation au réchauffement climatique : la vigne (documents 11 à 17).

Doc11. Variations de température et de la concentration de CO₂ depuis 400 000 ans en Antarctique.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Les variations de températures sur des milliers d'années en Antarctique, ont pu être déduites de l'étude des carottes de glace. L'analyse isotopique de l'eau renseigne sur la température locale de l'époque et les bulles d'air contenues dans la glace sur la composition en gaz atmosphériques. Des mesures en Antarctique. Des mesures en Arctique ont donné des résultats similaires.



Document 12. Les pollens, des indicateurs de variations climatiques passées.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Les tourbières sont des zones humides (marais ou lacs peu profonds) qui se remplissent de sédiments dans lesquels peuvent être piégés les pollens des végétaux vivant aux alentours. Les pollens peuvent être conservés des dizaines de milliers d'années et faire l'objet d'études après prélèvement par carottage.

En appliquant le principe d'actualisme, les pollens permettent de reconstituer localement les climats passés.

Exigences climatiques du pin sylvestre et du chêne pédonculé.

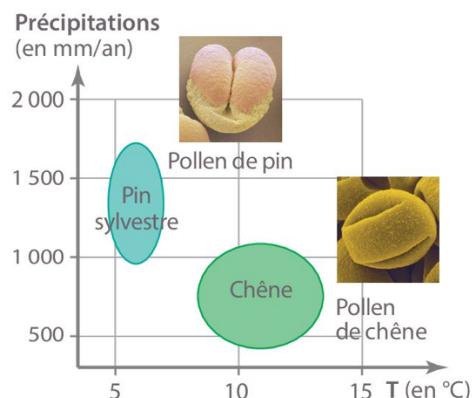
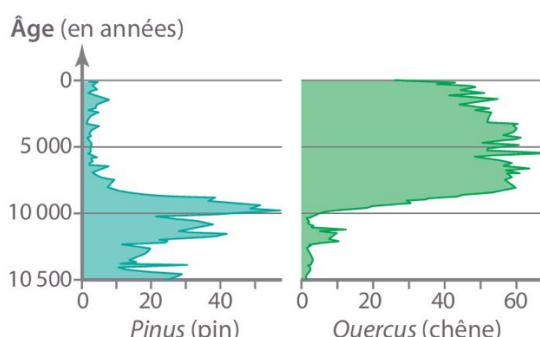


Diagramme pollinique représentant l'abondance des pollens en fonction de l'âge des sédiments.



Source : Rogers Lake, Connecticut (É-U), Davis, M. B.

Points sur lesquels insister.

- **Montrer** ici qu'on est au niveau d'une calotte glaciaire (à définir) et non d'une banquise (à définir).
- **Insister** sur la périodicité observée dans le graphe (températures). **Introduire** les notions de période glaciaire / interglaciaire, **donner** la durée approximative d'un cycle (= ensemble glaciaire + interglaciaire).
- **Corréler** au taux de CO₂ et **expliquer** la corrélation avec la notion de gaz à effet de serre (GES).
- Pour les pollens, **montrer** que c'est un autre type d'archive climatique, indiquer les résultats obtenus, et bien **expliquer** qu'on applique le principe d'actualisme.

Document 13. Évolution de la date de floraison des cerisiers à Kyoto de 850 à 2000.

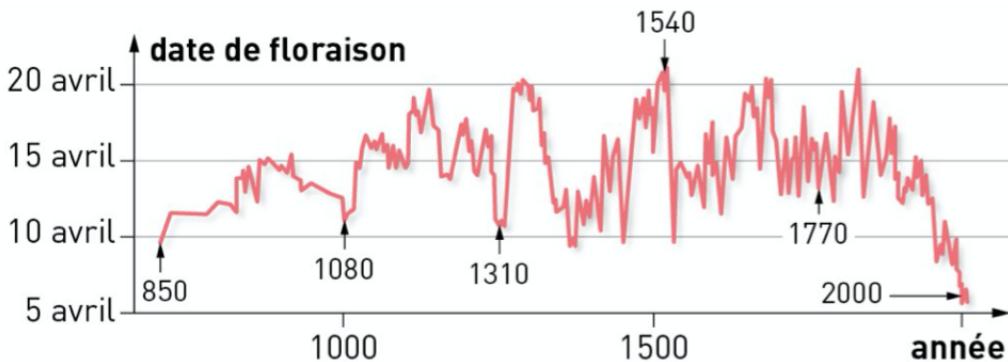
D'après Enseignement scientifique terminale Bordas 2020

La coutume de pique-niquer sous les cerisiers en fleur au Japon, appelée *hanami*, est très ancienne. Cette pratique est relatée par de nombreux écrits historiques. Ainsi, les dates de floraison des cerisiers sont bien connues pour ce pays depuis au moins l'an 850.



Document 14. Évolution de la date de floraison des cerisiers de Kyoto de 850 à 2 000.

D'après Enseignement scientifique terminale Bordas 2020



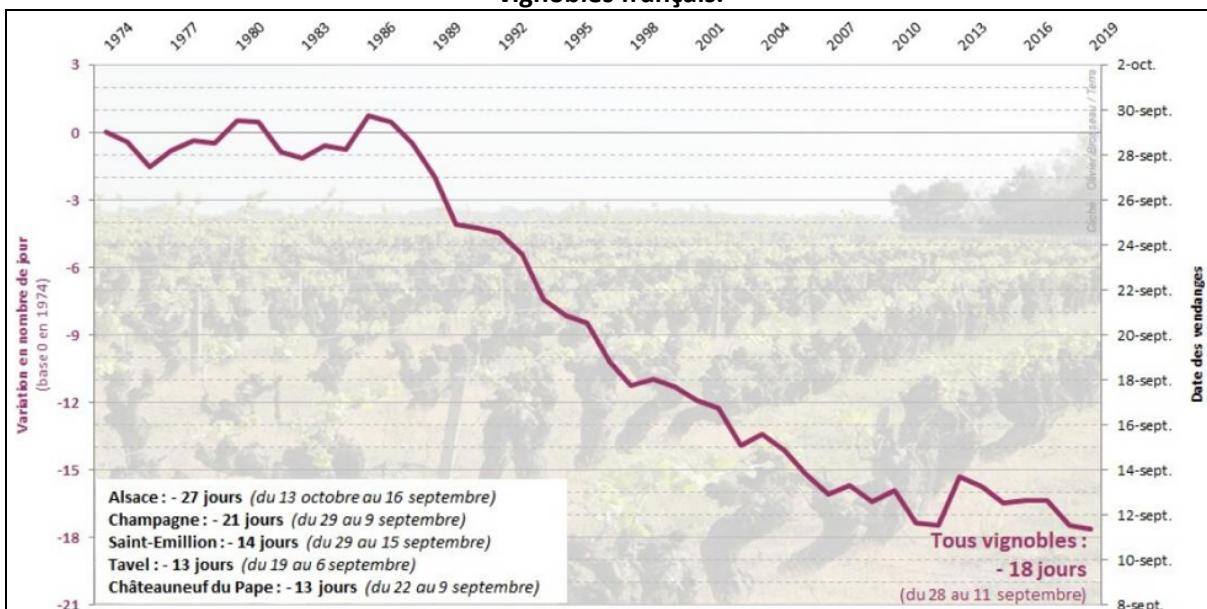
Document 15. Vendanges et économie du vin en France : un indicateur climatique.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Depuis plusieurs années, les dates de début des vendanges sont de plus en plus avancées dans différentes régions de France. Ceci serait dû à un avancement des stades de développement de la vigne (débourrement, floraison, véraison) ces 50 dernières années. Cette maturité précoce modifie différentes caractéristiques du vin : augmentation du taux de sucre (qui définit le degré d'alcool), diminution de l'acidité des vins, etc.

D'après Météo France, l'évolution des températures moyennes annuelles en Champagne montre un réchauffement de la température moyenne de 0,3°C par décennie depuis 1959.

Document 16. Évolution de la date moyenne des vendange entre 1974 et 2019 dans un panel de vignobles français.



Note : 1974 = moyenne décennale 1965-1974 et 2019 = moyenne décennale 2009-2019.



ONB Visuel ONB, d'après :

Origine des données : Inter-Rhône - ENITA Bordeaux - INRA Colmar - Comité interprofessionnel du vin de Champagne

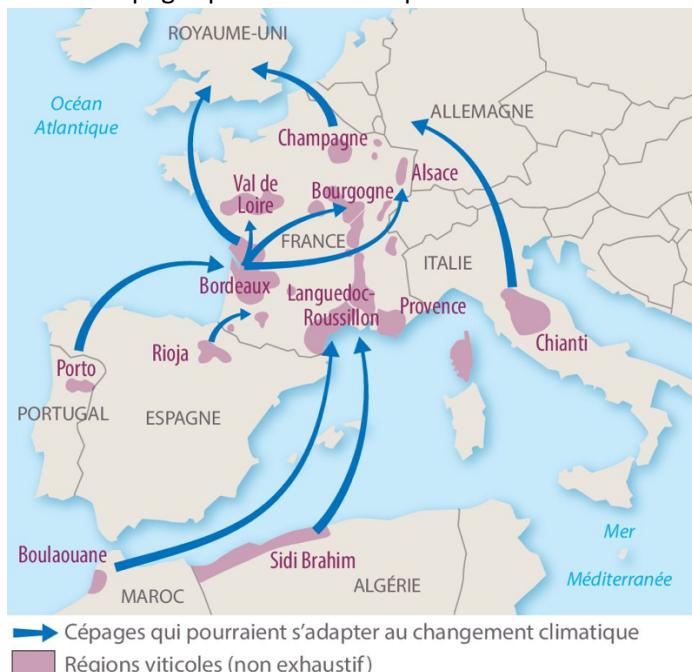
Traitements : ONERC - SDES, 2020

Source : <https://naturefrance.fr/indicateurs/dates-de-vendanges-en-france-metropolitaine> (consulté le 4/10/22)

Document 17. Réchauffement climatique et adaptation des cépages.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Cette carte montre comment les cépages pourraient s'adapter au réchauffement climatique.



Points sur lesquels insister.

- **Montrer** que l'observation de la végétation fournit des indices sur le changement climatique.
- Dans le cas de la vigne, **préciser** comment s'adapter dans le futur. Pour bien exploiter le document, **préciser** ce qu'est un « cépage ».

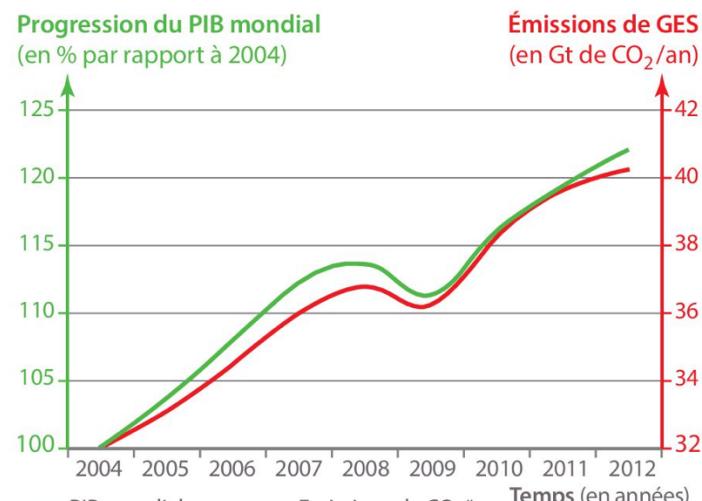
Bilan classe. PIB, croissance économique et effet de serre (documents 18 et 19).

Document 18. Croissance économique et effet de serre.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

On peut mesurer l'économie avec le PIB (produit intérieur brut), à différentes échelles géographiques. Si l'on compare le PIB mondial et les émissions de GES en fonction du temps, on constate une évolution parallèle de ces deux grandeurs. La corrélation est valable à la hausse comme à la baisse, aux niveau national ou mondial.

Source : J. M. Jancovici, <https://jancovici.com>

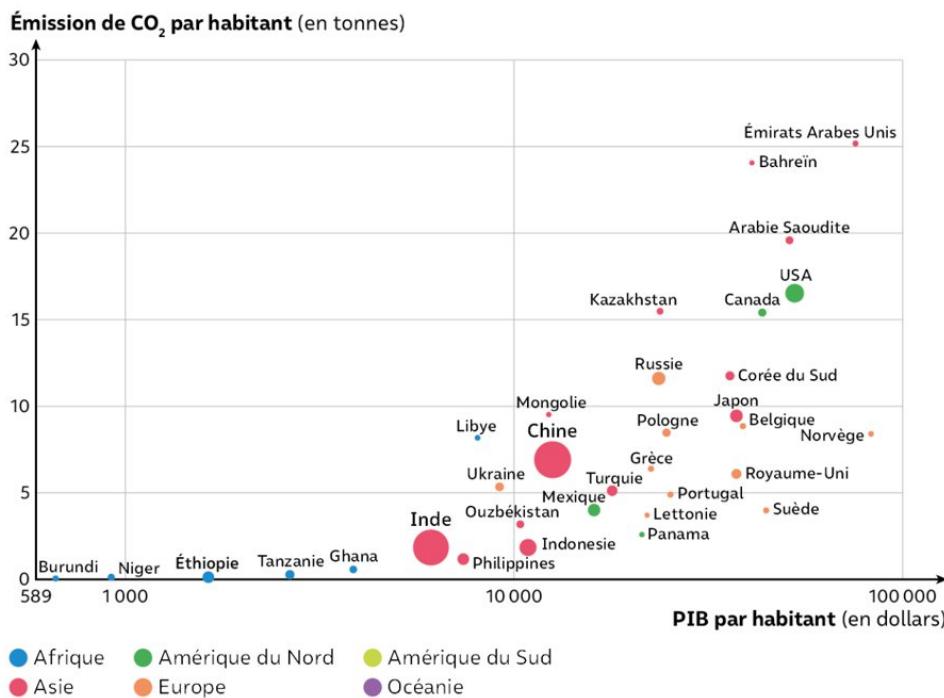


*Source : PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

Document 19a. Émission de CO₂ par habitant en fonction du PIB par habitant en 2016.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

La surface des disques représente l'émission totale du pays.



Compléments actualisés sur <http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CO2-emissions> (conseillé).

Document 19b. Exemple de graphique : le top 20 des plus gros émetteurs de CO₂ en 2024.

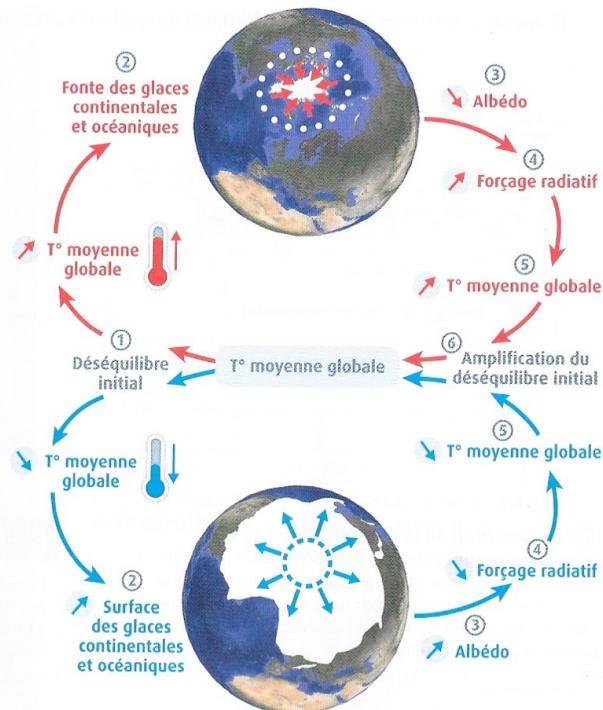
Territorial Per capita (tCO₂/person)

Rank	Country	tCO ₂ /person
1	Qatar	41
2	Kuwait	26
3	Brunei Darussalam	26
4	Bahrain	24
5	Trinidad and Tobago	23
6	Saudi Arabia	20
7	United Arab Emirates	20
8	New Caledonia	18
9	Oman	16
10	Australia	15
11	United States of America	14
12	Kazakhstan	14
13	Canada	13
14	Faeroe Islands	13
15	Mongolia	13
16	Palau	13
17	Curaçao	12
18	Russian Federation	12
19	Taiwan	11
20	South Korea	11

Travail 3. Les effets amplificateurs du changement climatique : l'exemple de la cryosphère (banquise, glace continentale, pergélisol). Documents 20 à 26 et document de référence.

Document de référence. Une rétroaction positive au niveau du climat : l'effet de l'albédo.

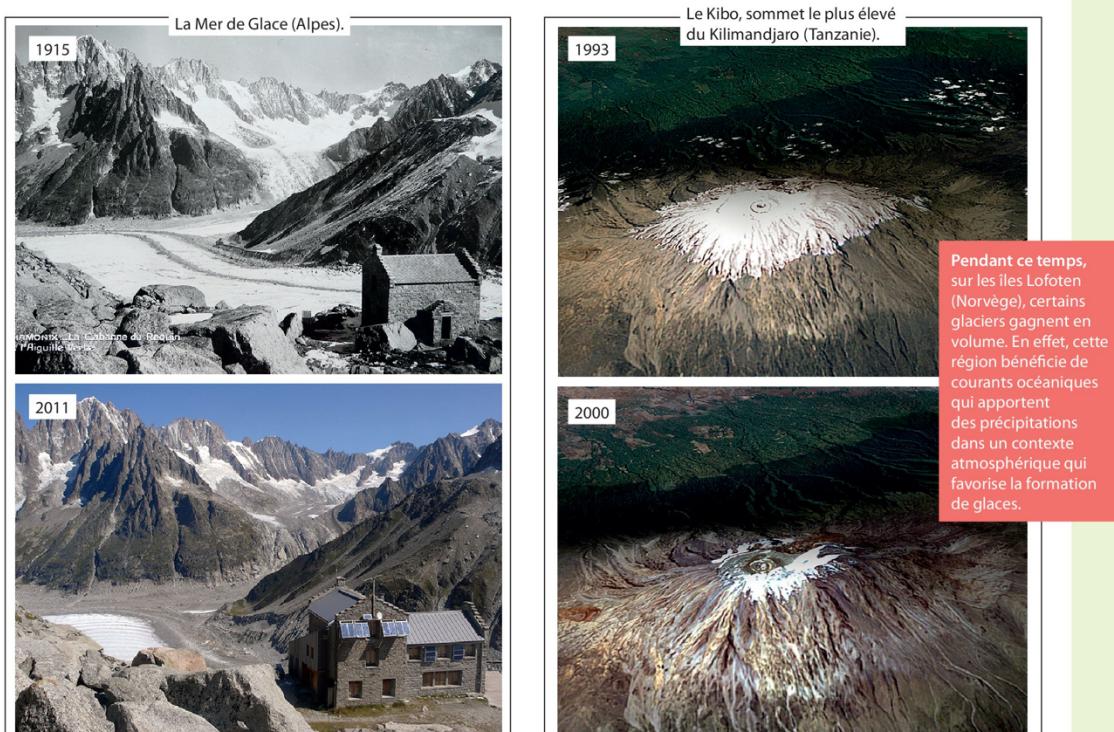
D'après Enseignement scientifique terminale Belin 2020



Document 20. La fonte de certains glaciers : une preuve du réchauffement climatique global ?

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Petit rappel sur les conditions de formation de la glace : il faut une température suffisamment froide et des précipitations qui apportent de l'eau.



La Mer de Glace est un glacier qui enregistre une diminution de son épaisseur d'environ 160 m entre les étés 1915 et 2011. Si la glace disparaît, c'est qu'elle fond en été (ablation) sans être remplacée en hiver (accumulation).

Au Mont Kilimandjaro, les glaciers diminuent de volume depuis plusieurs années. En effet, la localisation des moussons qui alimentent les précipitations de cette région se décalent latitudinalement, ce qui occasionne une baisse des précipitations sur le mont Kibo.

Document 21. Extension maximale de la banquise arctique en septembre 2018 comparée à celle de 1979 (en violet) et de 2000 (en orange).

D'après Enseignement scientifique terminale Bordas 2024



Document 22. Effet de la diminution de la cryosphère sur l'albédo.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Les étendues de neige et de glace (banquise, calottes et glaciers) réfléchissent de façon importante le rayonnement solaire. L'augmentation de la température à l'échelle de la planète, en provoquant leur fusion, réduit significativement ces surfaces. Les surfaces ainsi libérées sont plus sombres et absorbent plus de radiations solaires, contribuant encore à réchauffer la surface. On parle de **rétroaction positive**.

Type de surface	Valeurs moyennes de l'albédo
Neige fraîche	0,85
Glace	0,6 à 0,9
Prairie	0,4
Forêt	0,2
Océan	0,1

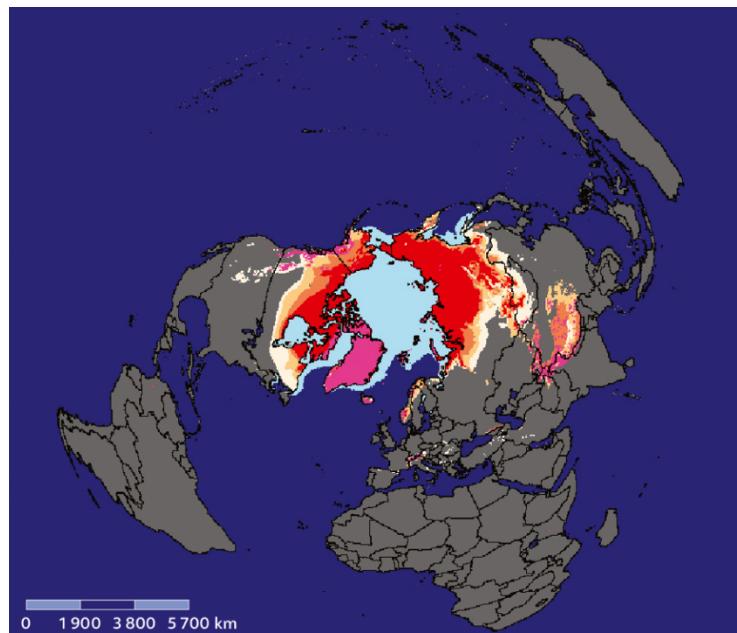
Points sur lesquels insister.

- **Définir** « cryosphère.
- **Indiquer** l'évolution actuelle de la surface de la banquise et des glaciers continentaux.
- **Montrer** que la fonte des glaces fait varier l'albédo terrestre (dans quel sens + terme à définir) et **montrer** qu'il s'agit d'une rétroaction positive (à définir).

Document 23. Localisation du pergélisol.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan et Hachette Éducation 2020

Le pergélisol (ou permafrost en anglais) représente 25 % des terres émergées dans l'hémisphère nord. Il s'agit d'un sol gelé toute l'année depuis au moins deux ans. C'est le plus gros réservoir de carbone continental de la planète.

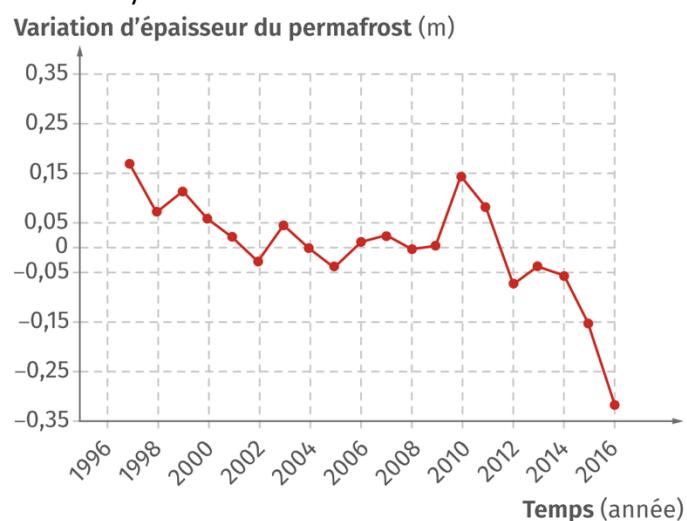


La couleur rouge indique les surfaces à 90-100 % couvertes par du permafrost. La couleur orange indique les surfaces à 50-90 % couvertes par du pergélisol.

Document 24. Variation d'épaisseur du pergélisol en Sibérie entre 1996 et 2016.

D'après Enseignement scientifique terminale Le Livre Scolaire 2020

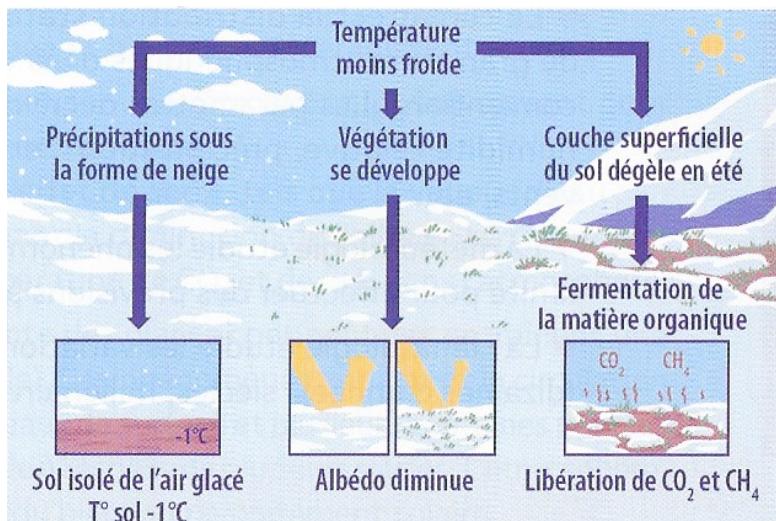
Le pergélisol est mesuré en de nombreux points du globe depuis plusieurs décennies. Le niveau 0 est le niveau moyen sur la période analysée.



Document 25. Pergélisol et régulation du climat.

D'après Enseignement scientifique terminale Hachette Éducation 2020

Le document ci-dessous vous présente l'effet du réchauffement climatique sur le pergélisol.



Document 26. Le dégel du pergélisol.

D'après Enseignement scientifique terminale Magnard 2020

- L'augmentation de la température entraîne le dégel du pergélisol, c'est-à-dire les sols gelés en permanence des régions arctiques. En temps normal, le pergélisol piège des éléments carbonés gazeux comme le méthane, produits par la décomposition de matière organique passée.
- Depuis la dernière glaciation, le pergélisol, qui représente 25 % des terres émergées de l'hémisphère nord, a accumulé 1 700 milliards de tonnes de carbone d'origine végétale, soit deux fois plus de carbone que n'en contient actuellement l'atmosphère.



Document 27. Quelques particularités d'un sol gelé en permanence.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

Le fait que le pergélisol soit en permanence gelé a de nombreuses conséquences. Par exemple, du fait de la température et de l'état solide de l'eau, l'activité microbienne est très réduite, par conséquent la décomposition de la matière organique du sol ne peut pas avoir lieu comme dans les sols des climats tempérés. Autre particularité, la très faible température du sol permet d'y stocker du méthane sous forme d'hydrates de méthane (molécules de méthane piégées au sein de la structure cristalline de la glace d'eau).

Points sur lesquels insister.

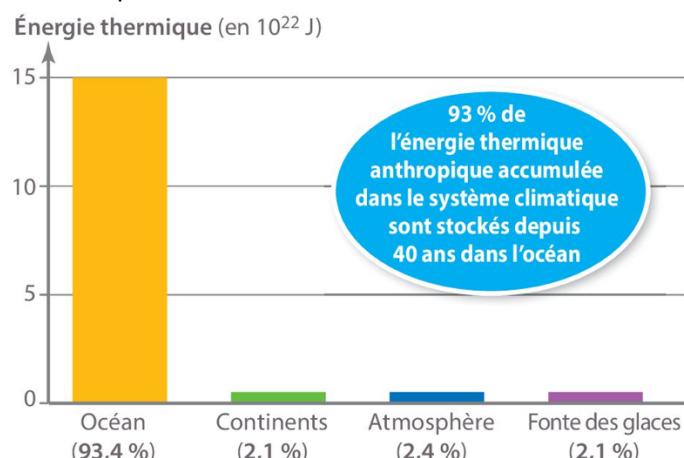
- Définir ce qu'est le pergélisol, indiquer sa localisation, déterminer son évolution actuelle ;
- Donner les conséquences de son dégel (en termes de libération de GES et donc en terme de rétroaction positive).

Travail 4. Réchauffement climatique et océans. Réchauffement climatique et végétalisation (documents 28 à 36).

Document 28. L'océan, un modérateur du climat.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

L'océan joue un rôle primordial dans la régulation du climat. Grâce à sa forte capacité thermique, l'océan est capable de stocker plus d'énergie thermique que l'atmosphère tout entière et a donc un effet modérateur sur la température moyenne de la planète. Cependant, ce stockage rend le changement climatique irréversible pour plusieurs siècles et entraîne un bouleversement important des écosystèmes marins (blanchiment des coraux par exemple). Par ailleurs, l'océan joue également un rôle d'amortisseur en absorbant une partie du CO₂ émis par les activités humaines.



Source : GIEC, 2013

Document 29. Une conséquence du réchauffement : la fusion des glaces continentales et de la banquise.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Depuis le début du XXe siècle, on constate une fusion accélérée des glaces continentales* ainsi qu'une régression régulière de la banquise* : ce sont des conséquences du réchauffement climatique. L'impact sur l'élévation du niveau moyen des océans constaté ces dernières décennies étant différent selon le type de glace considérée.

* Voir exposés précédents.

Document 30. Simulation de l'effet de la fusion des glaces sur le niveau des océans.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Il est possible de simuler l'impact de la fusion des glaces continentales (calottes, glaciers) et des glaces de mer (banquise) sur le niveau des océans. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Simulation de la fusion d'une calotte glaciaire ou d'un glacier

Début de l'expérience

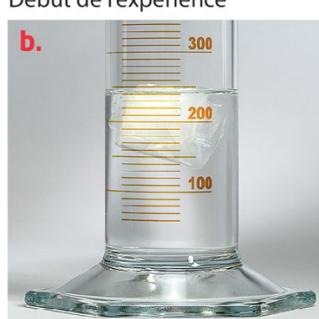


Fin de l'expérience



Simulation de la fusion de la banquise

Début de l'expérience



Fin de l'expérience



Document 31. Impact du phénomène de dilatation thermique de l'eau sur le niveau des océans.

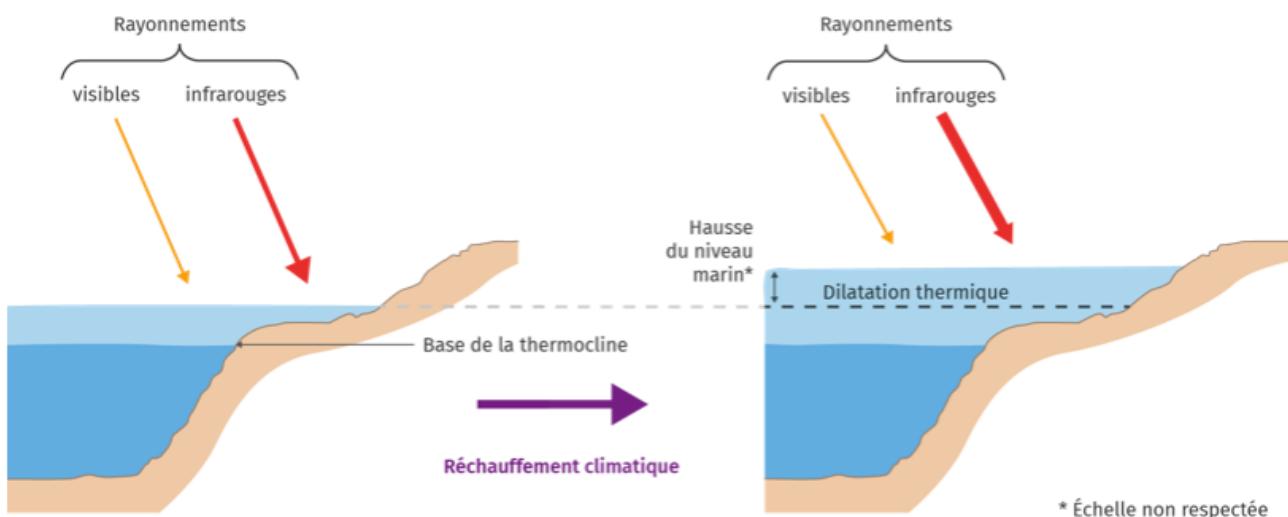
D'après Enseignement scientifique terminale Le Livre Scolaire 2024

À pression constante, tous les corps ont un volume qui varie selon la température. Cette variation est fonction de l'espèce chimique ou du mélange considéré. Dans le cas de l'eau pure, le coefficient de dilatation thermique est de $2,6 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Cela signifie qu'une augmentation de la température de $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pour 1 litre d'eau augmentera son volume de 0,00026 L, soit 0,26 mL. Ceci peut paraître faible, mais doit être rapporté au volume des océans qui occupent 70 % de la surface du globe.

Il existe dans les océans une profondeur à partir de laquelle la température de l'eau reste à peu près constante. Cette zone nommée thermocline est située aux alentours de 1 000 m de profondeur.

La dilatation thermique ne concerne donc que l'eau située au-dessus de cette thermocline. De nombreux effets locaux peuvent amplifier le phénomène : la hausse du niveau marin en cas de réchauffement climatique ne sera donc pas la même partout à la surface du globe.

Document 31. Le mécanisme de dilatation thermique de l'eau



Document 32. Une simulation des effets de l'augmentation du niveau marin.

Ce site permet de visualiser les effets d'une augmentation du niveau marin.

<http://flood.firetree.net>

Points sur lesquels insister.

- **Montrer** le rôle de l'océan en tant que régulateur du climat (notamment en tant que stockeur d'énergie, ce qui rend le changement climatique irréversible pour plusieurs siècles).
- **Montrer** que la fusion d'une banquise n'a pas le même impact sur le niveau marin que la fusion des glaciers continentaux.
- **Relier** la hausse du niveau océanique à la fusion des glaces continentales seules et aussi à la dilatation thermique.
- **Utiliser** le site du document 32 pour illustrer l'effet de la hausse du niveau marin au niveau des Pays-Bas.

Document 33. Croissance végétale et photosynthèse.

D'après Enseignement scientifique terminale Le Livre Scolaire 2024

La photosynthèse permet la séquestration d'une partie du dioxyde de carbone de l'atmosphère dans la matière organique des végétaux, tant que le végétal est en croissance (forêts en développement). Si la forêt est à l'équilibre, elle ne constitue plus un puits de carbone. Les stocks et flux de carbone relatifs aux forêts et terres cultivées ont été estimés. Un flux négatif correspond à une émission, un flux positif à un stockage. La sensibilité au changement climatique illustre la différence de séquestration entre deux scénarios du GIEC.

Document 34. Données relatives au puits de carbone des végétaux en France (mars 2019)
 Mt = Millions de tonnes. CO₂e = équivalent CO₂

	Stock actuel (en Mt CO ₂ e)	Flux actuel (en Mt CO ₂ e.an ⁻¹)	Sensibilité au changement climatique (en Mt CO ₂ e)
Terres cultivées	5 408	-1,4	848
Forêt métropolitaine	10 263	87	1 314
Forêt guyanaise	9 026	0	0

Document 35. Des effets modérateurs sur l'évolution de la température.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Pour lutter contre le réchauffement climatique, des opérations de reforestation ont été engagées dans différents pays. Ainsi, depuis les 5 dernières années, 33 millions d'arbres ont été plantés en Chine. Certains pays pulvérissent même des records : 67 millions d'arbres plantés en douze heures en Inde en 2017 ! De même, de nombreuses métropoles lancent des campagnes de végétalisation des zones urbaines.

Le végétal, par évapotranspiration, joue localement un rôle régulateur sur la température. De plus, grâce à la photosynthèse, les végétaux chlorophylliens constituent des puits de carbone importants, limitant ainsi le réchauffement climatique à court terme.

Document 36. Projet de végétalisation de Paris en 2050 par l'architecte Vincent Callebaut.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020



Points sur lesquels insister.

- **Expliquer** le rôle de la végétation en tant que régulateur du changement climatique.
- **Montrer** que tous les écosystèmes n'ont pas le même importance dans la régulation du changement climatique.
- **Commenter** la dernière image.