

Liste des exposés

<i>Groupe 1. Météorologie, climatologie et variations climatiques (documents 1 à 8).....</i>	<i>1</i>
<i>Groupe 2. CO₂, variations de température passées et archives climatiques (documents 9 à 15).....</i>	<i>4</i>
<i>Bilan classe. Le forçage radiatif du système climatique (document 16).</i>	<i>7</i>
<i>Groupe 3. Infrarouges, effet de serre et gaz à effet de serre (GES) (documents 17 à 19).....</i>	<i>7</i>
<i>Bilan classe. PIB, croissance économique et effet de serre (documents 20 et 21).</i>	<i>9</i>
<i>Groupe 4. Les effets amplificateurs du changement climatique : cryosphère, pergélisol, niveau marin et albédo (documents 22 à 30 et document de référence).</i>	<i>10</i>
<i>Bilan. L'océan, un modérateur du climat et la dilatation thermique de l'eau (documents 31 et 32).</i>	<i>14</i>
<i>Bilan. Végétalisation et modération du changement climatique (documents 34 et 35).</i>	<i>15</i>

Groupe 1. Météorologie, climatologie et variations climatiques (documents 1 à 8).

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.

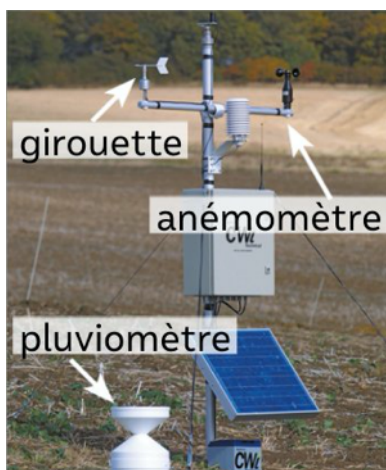
Chacun peut consulter ses conditions météo locales sur des sites de référence grâce aux stations météorologiques qui les enregistrent.

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).

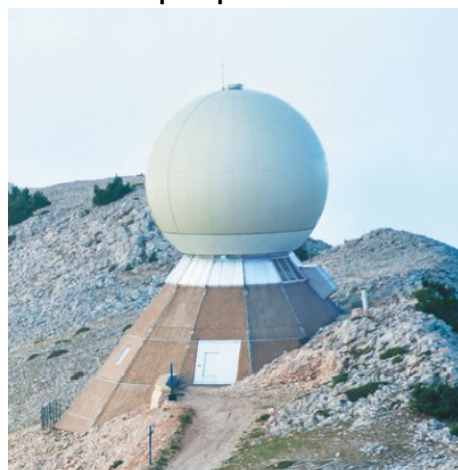
Station météorologique et ses capteurs



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



Radar météorologique utilisé pour repérer les précipitations



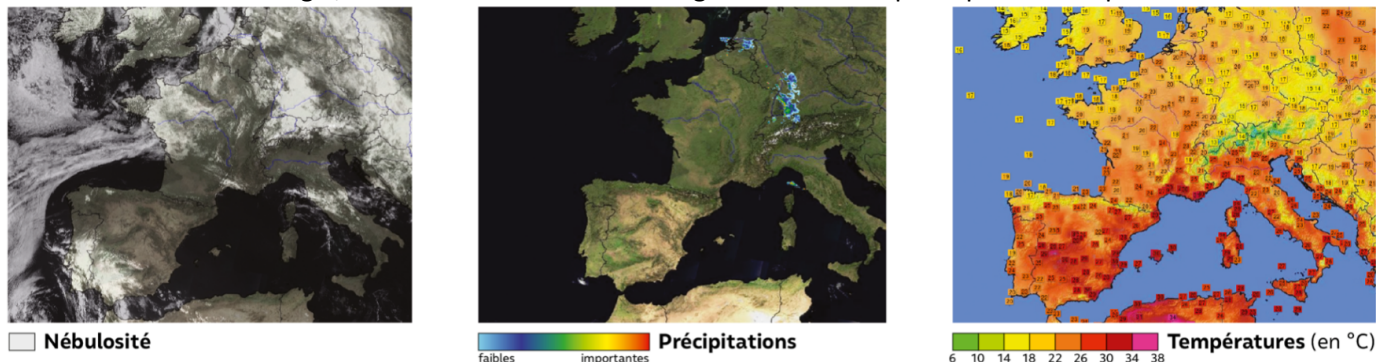
Radiosondage équipé de capteurs de pression, de température et d'humidité.



Document 3. 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 4. 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-calcul-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.
- **Indiquer** comment sont réalisées les prévisions (lien grandeurs mesurées / modélisation/ supercalculateur).

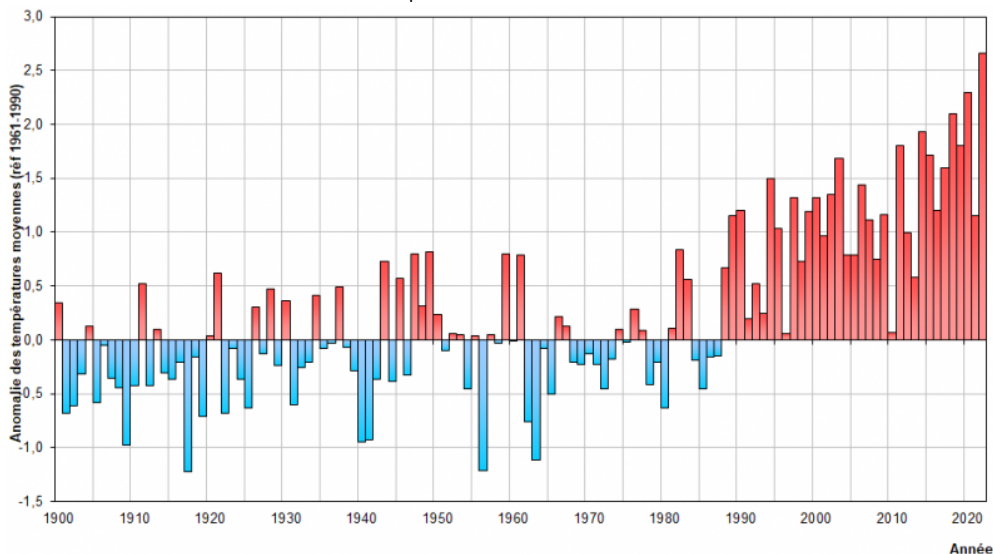
Document 5. Quand « climat » rime avec « moyennes ».

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** 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 5. Écart des températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1900 (normale 1961-1990).

D'après Météo France 2023



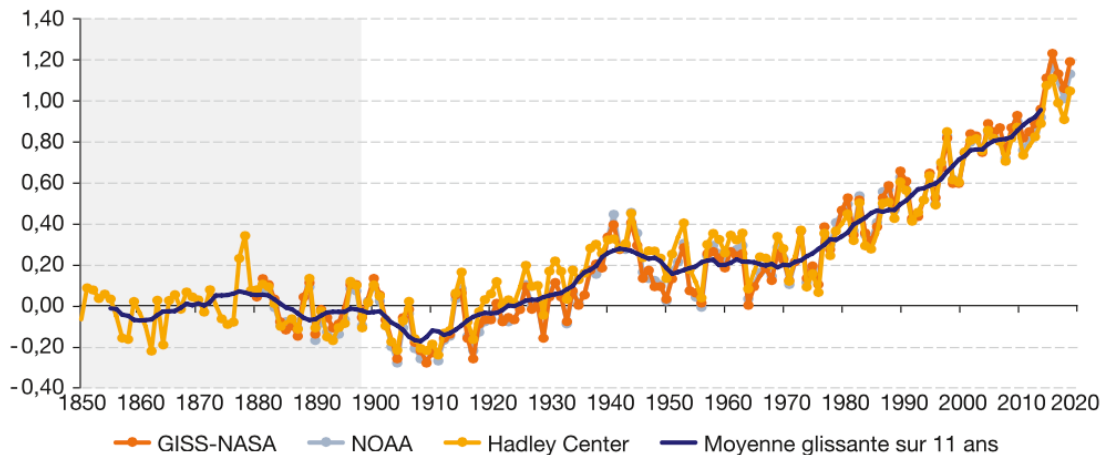
Document 6. Variations de température à l'échelle du globe depuis 1850 jusqu'en 2019.

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.

En °C

Anomalie des températures (référence 1850-1900)

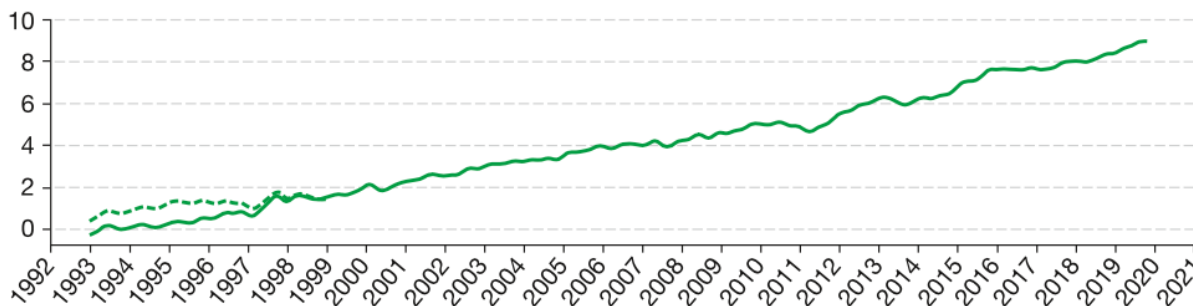


Note : en grisé la période préindustrielle 1850-1900.

Sources : NASA ; NOAA ; Hadley Center

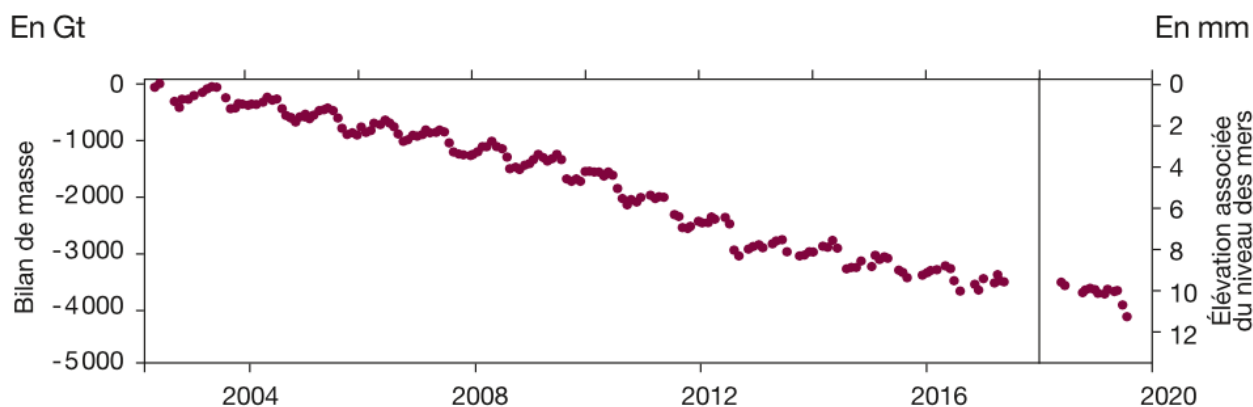
Document 7. Évolution du niveau mondial océanique entre 1992 et 2020.

En cm



Source : E.U. Copernicus Marine Service Information

Document 8. Bilan de masse des glaces du Groenland de 2002 à 2019.



Source : GRACE, GRACE-FO. Traitement : Danish Meteorological Institute, GEUS, DTU Space

Points sur lesquels insister.

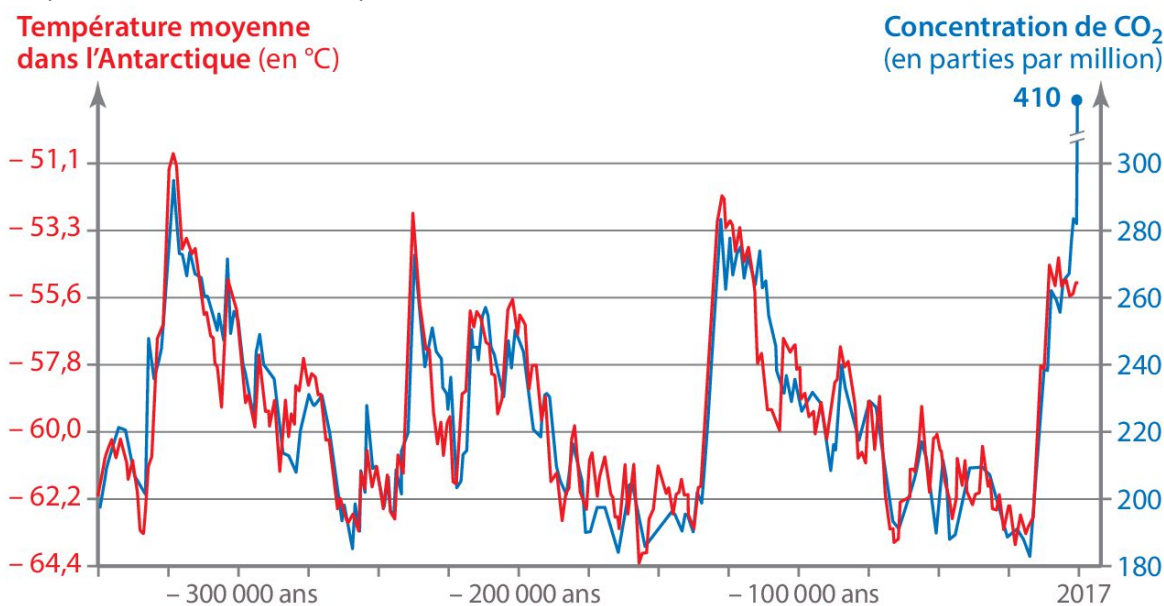
- **Définir** la notion de climatologie.
- **Indiquer** l'évolution des températures françaises depuis 1900, puis mondiales depuis 1850 (c'est juste un constat : aucune explication est demandée).
- **Indiquer** les évolutions du niveau océanique et du bilan de masse des glaces du Groenland (constat seul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

Groupe 2. CO₂, variations de température passées et archives climatiques (documents 9 à 15).

Doc9. 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.



Source : CNRS, carottage de glaces de Vostok (Antarctique).

Document 10. 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.

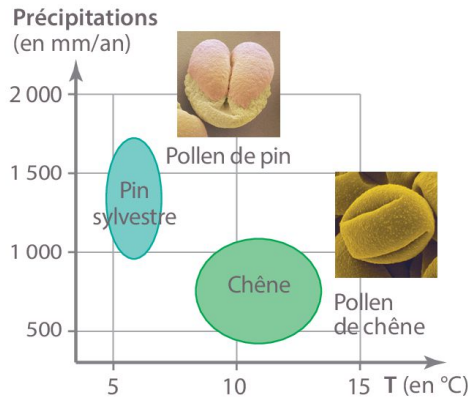
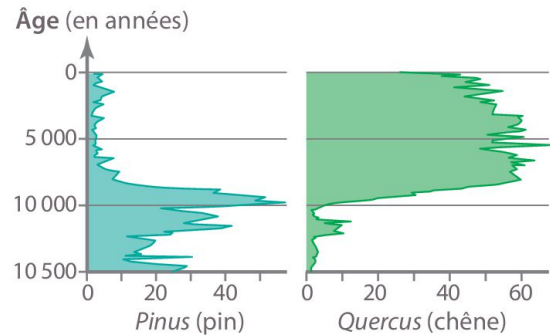


Diagramme pollinique représentant l'abondance des pollens en fonction de l'âge des sédiments.



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

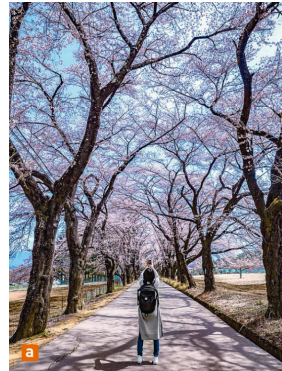
Points sur lesquels insister.

- **Montrer** ici qu'on est au niveau d'une calotte glaciaire (à définir) et non d'une banquise.
- **Insister** sur la périodicité observée dans le graphe (température). **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 11. Évolution de la date de floraison des cerisiers à Kyoto de 850 à 2000.

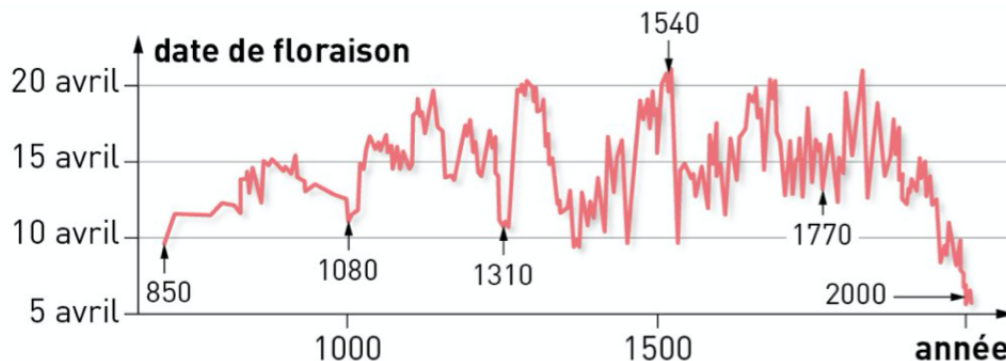
D'après Enseignement scientifique terminale Bordas 2020

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

D'après Enseignement scientifique terminale Bordas 2020



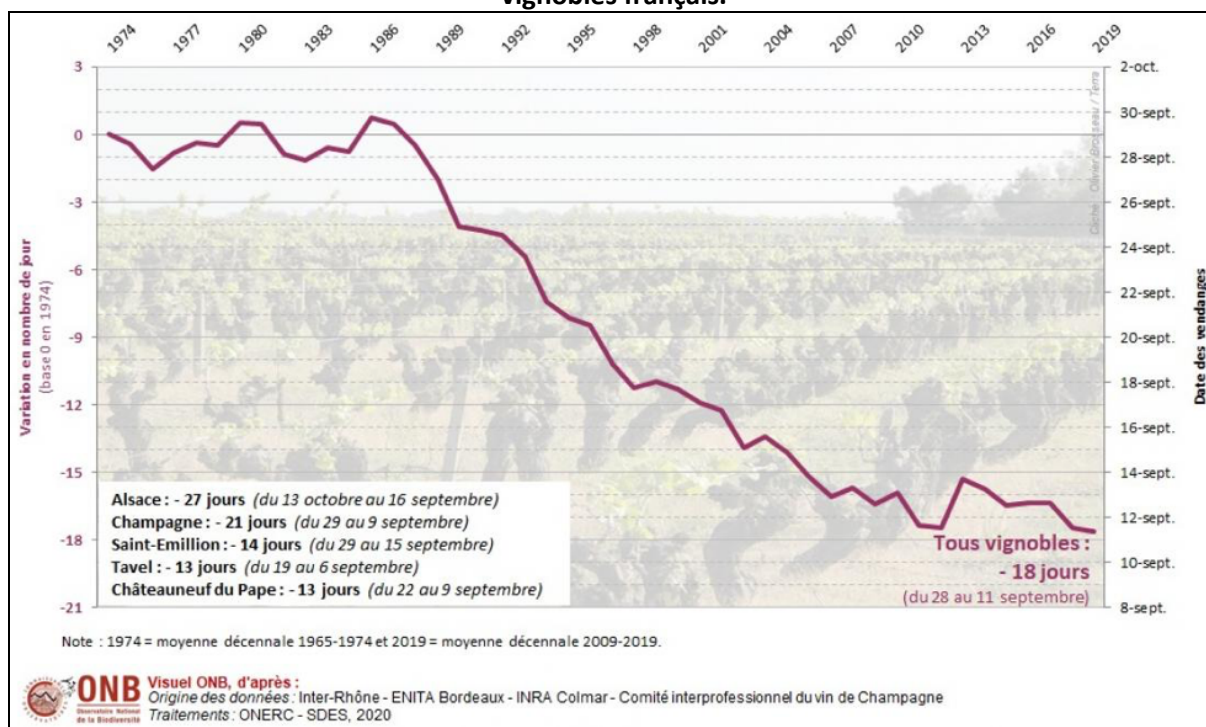
Document 13. Vendanges et économie du vin en France : un indicateur climatique.

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.

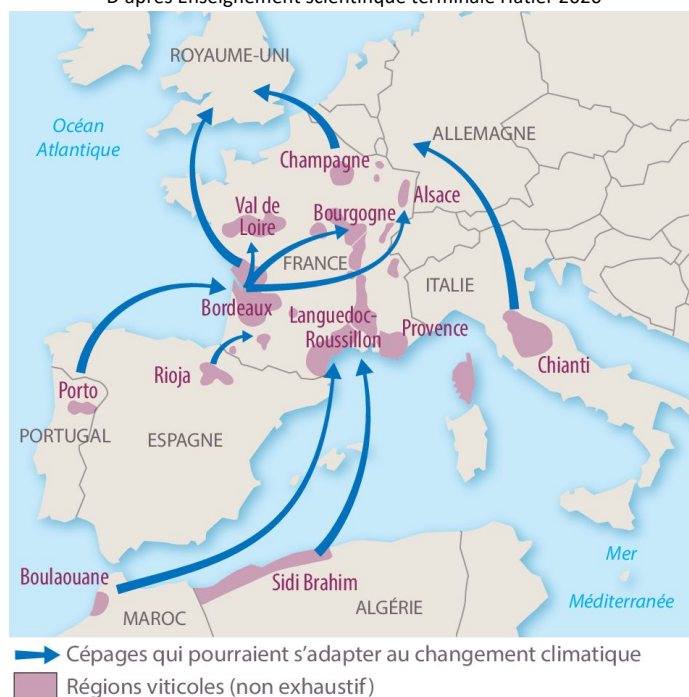
Document 14. Évolution de la date moyenne des vendange entre 1974 et 2019 dans un panel de vignobles français.



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

Document 15. Réchauffement climatique et adaptation des cépages.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020



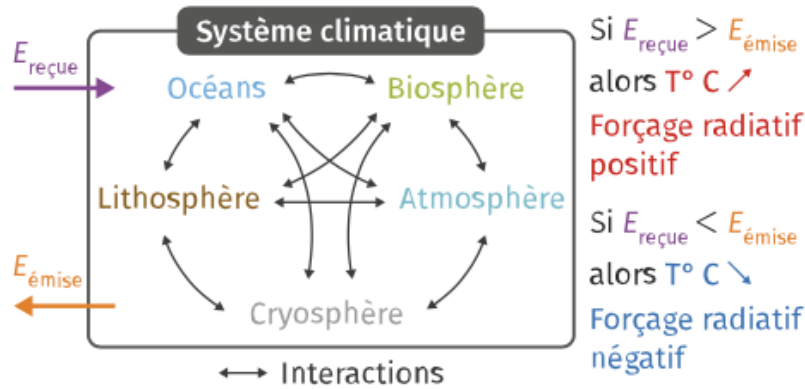
Points sur lesquels insister.

- **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. Le forçage radiatif du système climatique (document 16).

Document 16. Les forçages radiatifs du système climatique.

D'après Enseignement scientifique terminale Le Livre Scolaire 2020



Groupe 3. Infrarouges, effet de serre et gaz à effet de serre (GES) (documents 17 à 19).

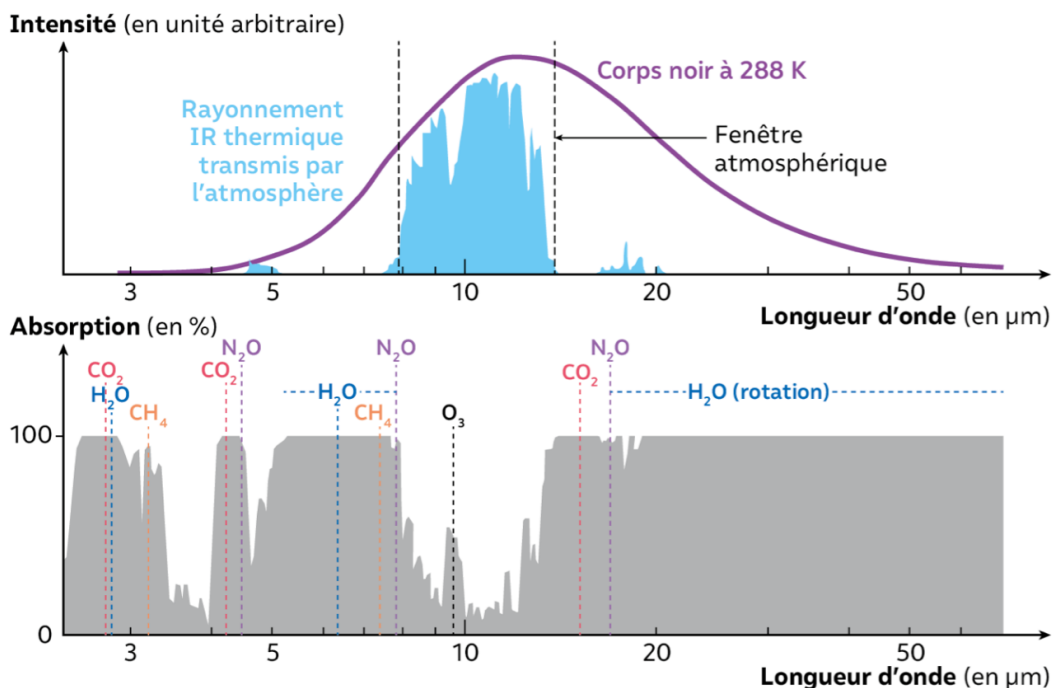
Document 17. Transmission et absorption du rayonnement électromagnétique dans l'atmosphère terrestre.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

A 15°C soit 288 K, un corps en équilibre thermique émet un rayonnement infrarouge (IR) d'émission maximale à une longueur d'onde de 10 μm (loi de Wien).

Ce rayonnement est absorbé par certains gaz, appelés gaz à effet de serre (GES). Outre la nature du gaz, l'absorption dépend de la concentration de gaz dans l'atmosphère multipliée par l'épaisseur d'atmosphère traversée.

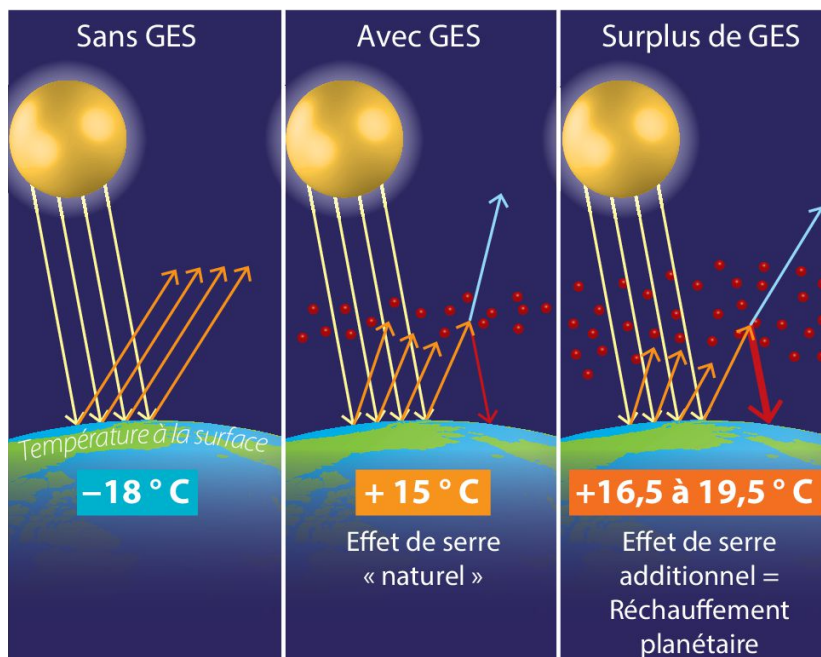
En dehors de la fenêtre atmosphérique, l'atmosphère est opaque au rayonnement infrarouge : le rayonnement émis par la surface de la Terre est intégralement absorbé par les GES contenus dans l'atmosphère.



On rappelle que les activités humaines émettent des GES, en particulier CO_2 et CH_4 .

Document 18. Effet de forçage radiatif par le surplus des GES.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020



Document 19. Émissions de GES et impact sur l'effet de serre.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Aux émissions de GES dits naturels (exemple : CO_2 , H_2O), qui s'additionnent à ceux déjà présents, s'ajoutent, depuis le début du XXe siècle, des gaz d'origine industrielle qualifiés d'« artificiels », principalement des halocarbures ($\text{C}_x\text{H}_y\text{Hal}_z$) où Hal représente un ou plusieurs gaz halogènes tels que fluor, chlore, brome et astate. Ces molécules absorbent très fortement les infrarouges, environ 5 700 fois plus que le CO_2 et sont chimiquement très stables dans l'atmosphère. Elles proviennent de différents secteurs industriels.

Gaz*	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère (en années)	Pouvoir de réchauffement global à 100 ans**
CO_2	100 à + de 1 000	1
CH_4	12	28
N_2O	120	265
$\text{C}_x\text{H}_y\text{Hal}_z$	Jusqu'à 50 000	Jusqu'à 23 000

* La vapeur d'eau peut séjourner dans l'atmosphère durant un laps de temps très court.

** Le PRG d'un gaz est l'estimation de l'impact potentiel d'un gaz sur l'effet de serre pour l'émission d'1 kg de ce gaz relativement à 1 kg de CO_2 . Il est calculé sur la base d'un horizon fixé à 100 ans.

Points sur lesquels insister.

- **Exploiter** le document 17 pour **rappeler** que suivant la loi des corps noirs la Terre émet dans les IR (programme de première d'ES qui n'est pas redémontrer) ;
- **Montrer** que certains gaz absorbent les IR (citer ces gaz) / les **qualifier** de GES. **Pointer** la fenêtre atmosphérique.
- **Rappeler** l'effet de serre. **Parler** de l'effet de serre additionnel anthropique. **Expliquer** le tout en tant que forçage radiatif.
- **Quantifier** le temps de présence des GES dans l'atmosphère. **Expliquer** le PRG. Pour vous aider, si les $\text{C}_x\text{H}_y\text{Hal}_z$ persistent aussi longtemps dans l'atmosphère, c'est qu'il n'existe pas de puits naturel.

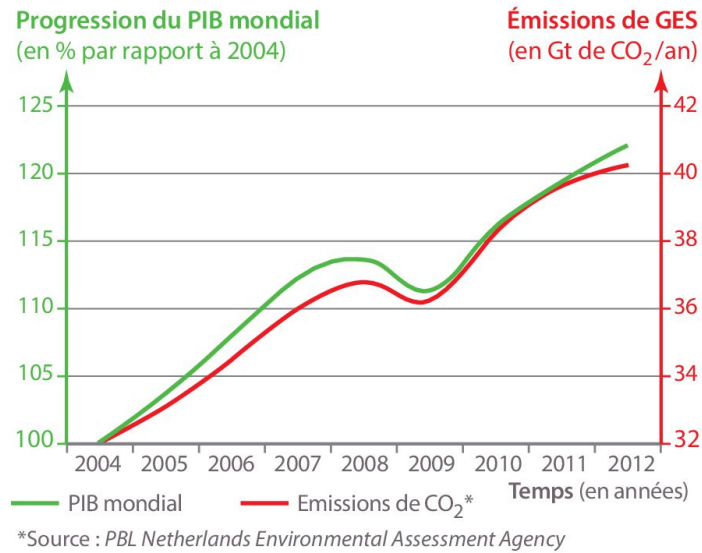
Bilan classe. PIB, croissance économique et effet de serre (documents 20 et 21).

Document 20. 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 niveaux national ou mondial.

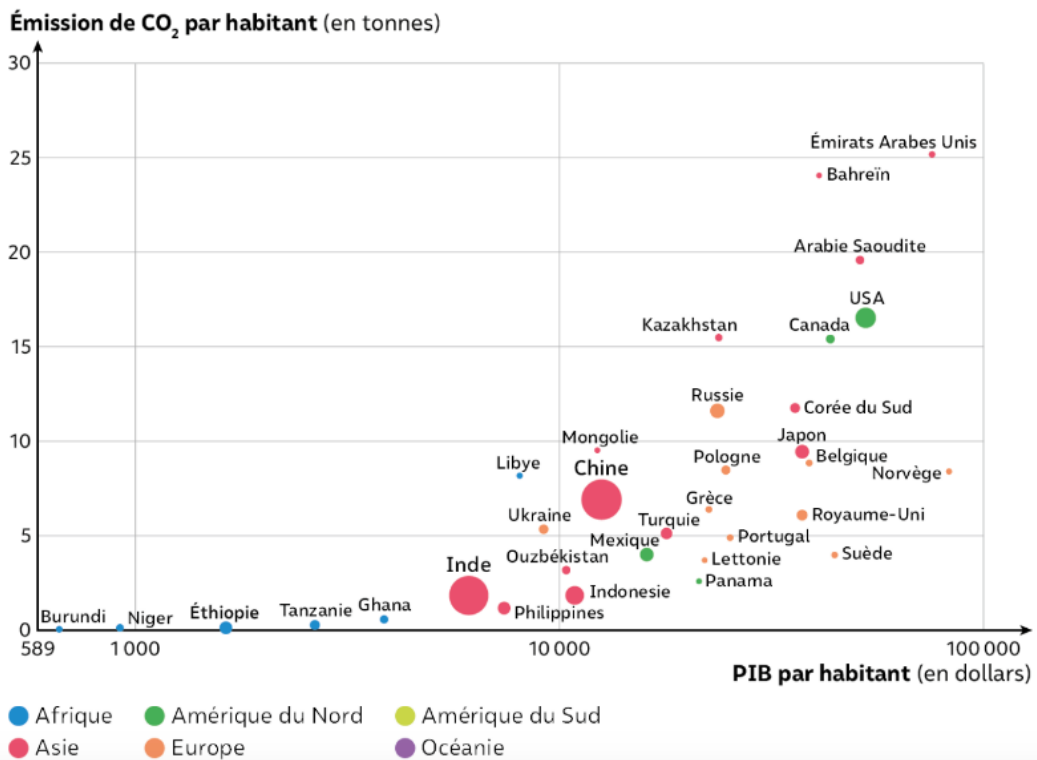
Source : J. M. Jancovici, <https://jancovici.com>



Document 21a. 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 21b. Exemple de carte : le top 20 des plus gros émetteurs de CO₂ en 2021.

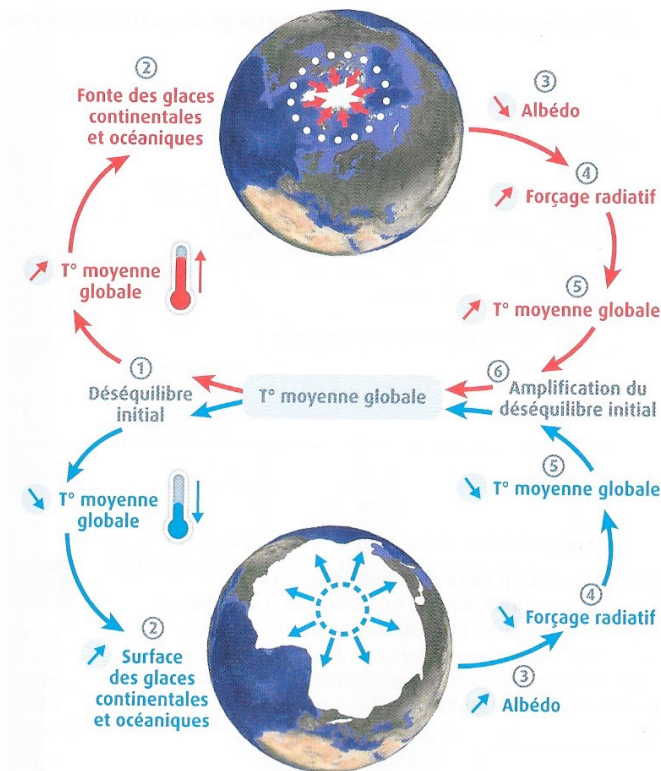
Territorial Per capita (tCO₂/pers)

Rang	Pays	tCO ₂ /pers
1	Qatar	36
2	Bahrein	27
3	Koweït	25
4	Trinité-et-Tobago	24
5	Brunel	24
6	Emirats arabes unis	22
7	Nouvelle-Calédonie	19
8	Arabie Saoudite	19
9	Oman	18
10	Australie	15
11	Mongolie	15
12	États-Unis	15
13	Kazakhstan	14
14	Canada	14
15	Palaos	13
16	Îles Féroé	13
17	Turkménistan	13
18	Luxembourg	13
19	Fédération de Russie	12
20	Corée du Sud	12

Groupe 4. Les effets amplificateurs du changement climatique : cryosphère, pergélisol, niveau marin et albédo (documents 22 à 30 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 22. Une conséquence du réchauffement : la fusion des glaces continentales et de la banquise.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

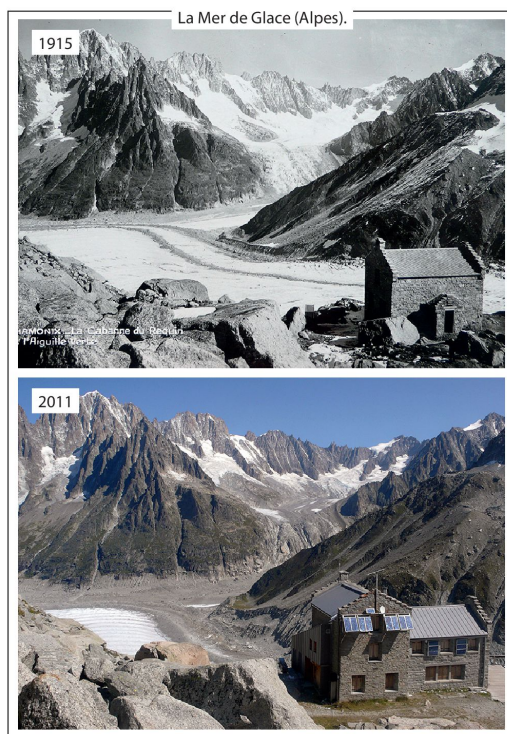
Depuis le début du XXe siècle, on constate une fusion accélérée des glaces continentales* ainsi qu'une régression régulière de la banquise* : ce sont des conséquences du réchauffement climatique. L'impact sur l'élévation du niveau moyen des océans constaté ces dernières décennies étant différent selon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

* Voir exposés précédents.

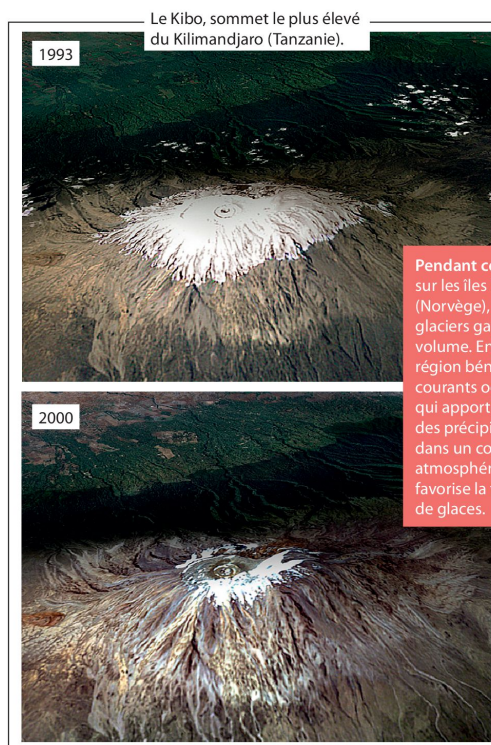
Document 23. La fonte de certains glaciers : une preuve du réchauffement climatique global ?

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).



Pendant ce temps, sur les îles Lofoten (Norvège), certains glaciers gagnent en volume. En effet, cette région bénéficie de courants océaniques qui apportent des précipitations dans un contexte atmosphérique qui favorise la formation de glaces.

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 24. 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

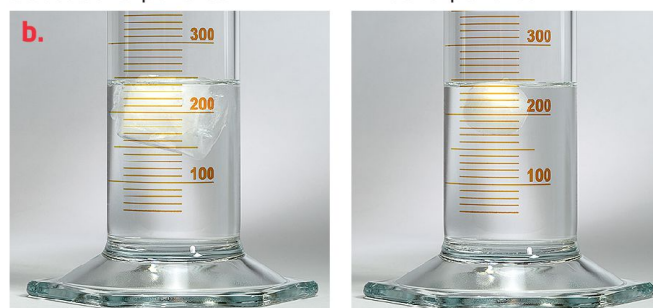
Fin de l'expérience



Simulation de la fusion de la banquise

Début de l'expérience

Fin de l'expérience



Document 25. 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

Note à exploiter : les océans ont un albédo faible : ils emmagasinent donc une grande quantité d'énergie ce qui rend le changement climatique irréversible sur des échelles de temps de plusieurs siècles.

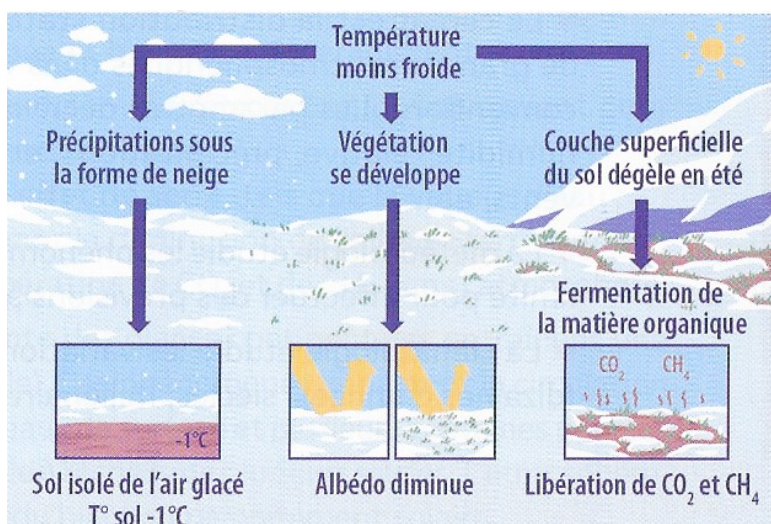
Points sur lesquels insister.

- **Indiquer** l'évolution actuelle de la surface des glaciers continentaux.
- **Montrer** que la fusion d'une banquise n'a pas le même impact sur le niveau marin que la fusion des glaciers continentaux (et **définir** « cryosphère »).
- **Montrer** que la fonte des glaciers continentaux fait varier l'albédo terrestre (à définir) et **montrer** qu'il s'agit d'une rétroaction positive (à définir).
- **Relier** aussi la hausse du niveau océanique à un accroissement de leur surface, et à l'albédo global planétaire. **Montrer** que les océans stockent beaucoup d'énergie.

Document 26. Pergélisol et régulation du climat.

D'après Enseignement scientifique terminale 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. Le document ci-dessous vous présente l'effet du réchauffement climatique sur le pergélisol.



Document 27. 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.



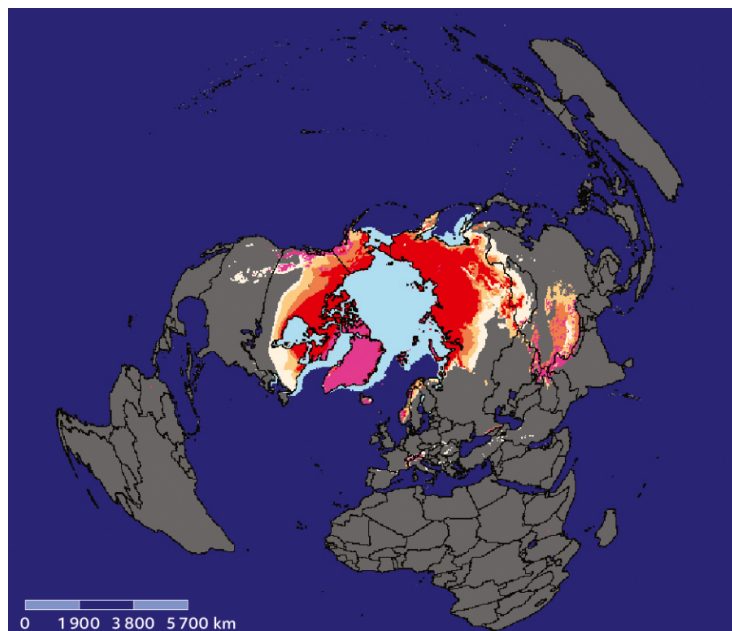
Document 28. Quelques particularités d'un sol gelé en permanence.

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).

Document 29. Localisation du pergélisol.

D'après Enseignement scientifique terminale Nathan 2020

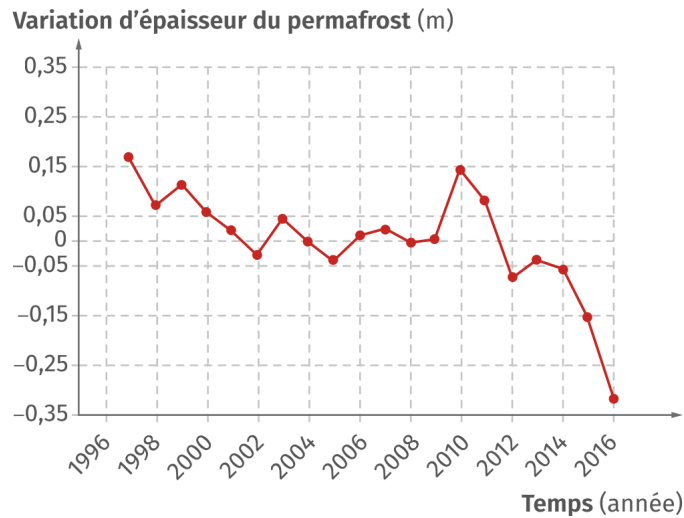


La couleur rouge indique les surfaces à 90-100 % couvertes par du permafrost. La couleur orange indique les surfaces à 50-90 % couvertes par du permafrost.

Document 30. 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.



Points sur lesquels insister.

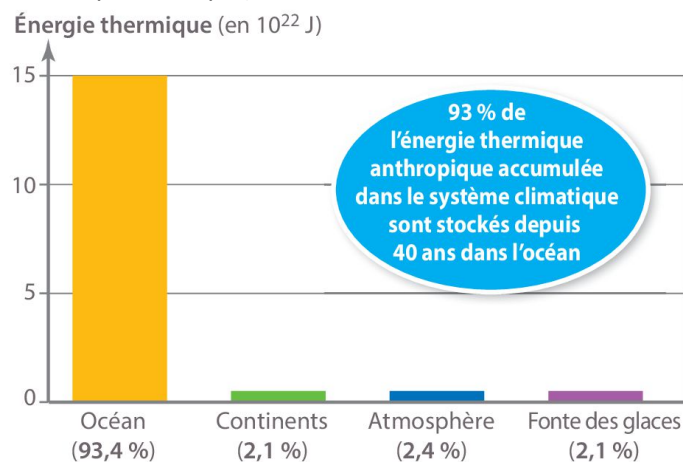
- **Définir** ce qu'est le pergélisol, où il est localisé, son évolution actuelle ;
- **Donner** les conséquences de son dégel (en terme d'albédo, de libération de GES et donc en terme de rétroaction positive).

Bilan. L'océan, un modérateur du climat et la dilatation thermique de l'eau (documents 31 et 32).

Document 31. 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).

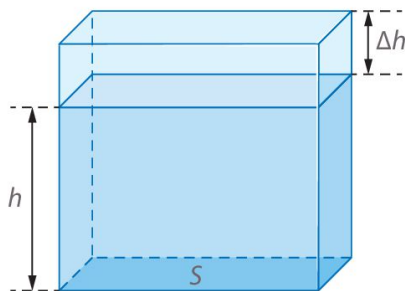


Source : GIEC, 2013

Document 32. Impact du phénomène de dilatation thermique de l'eau sur le niveau des océans.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

Au cours du XX^e siècle, la température moyenne de la Terre a augmenté de 0,6°C et, en parallèle, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 20 cm. Or, l'eau se dilate si sa température augmente. D'après le GIEC, d'ici 2100, la température moyenne de l'atmosphère pourrait augmenter de +5,5°C. La surface totale des mers et des océans est $S = 3,6 \times 10^{14} \text{ m}^2$, et son volume peut être modélisé par un parallélépipède rectangle de surface S . On estime que la hauteur d'eau actuellement affectée par le réchauffement climatique est $h = 1000 \text{ m}$ et son volume V . Une élévation de température de +5,5°C a pour conséquence une augmentation relative du volume $\frac{\Delta V}{V}$ égale à 0,0007.



Document 33. Site Flood firetree (pour information).

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

<http://flood.firetree.net>

Bilan. Végétalisation et modération du changement climatique (documents 34 et 35).

Document 34. 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 pulvérisent 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 35. Projet de végétalisation de Paris en 2050 par l'architecte Vincent Callebaut.

D'après Enseignement scientifique terminale Hatier 2020

