

Climats passés et changement climatique

COURS • S16 • TERMINALE

Spécialité de terminale, programme officiel. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ton enseignant fait foi.

Sommaire du cours

Ce que tu dois savoir faire	1
Cours	1
Exemples résolus	9
Méthodes et pièges	10
Vers le PASS	11
Exercices	11
Corrigés	13

Ce que tu dois savoir faire

- Distinguer météorologie et climat, et définir les grandeurs qui décrivent un climat.
- Expliquer le principe du thermomètre isotopique ($\delta^{18}\text{O}$) dans les glaces et dans les carbonates marins, et interpréter des courbes.
- Exploiter un diagramme pollinique et d'autres indices (moraines, sédiments, bulles d'air des glaces) pour reconstituer un climat passé.
- Décrire les cycles glaciaires et interglaciaires du Quaternaire et les relier aux paramètres orbitaux de la Terre et aux rétroactions.
- Expliquer l'effet de serre à partir du bilan radiatif de la Terre et citer les principaux gaz à effet de serre.
- Décrire le cycle du carbone (réservoirs, flux, temps de résidence) et ses perturbations par les activités humaines.
- Citer et exploiter les observations du changement climatique actuel et les arguments qui l'attribuent aux activités humaines.
- Distinguer les mesures d'atténuation et d'adaptation, et raisonner sur des ordres de grandeur d'émissions.

Cours

1. Climat, météo et archives du climat

La **météorologie** décrit l'état de l'atmosphère à un instant et en un lieu (temps qu'il fait). Le **climat** est la description statistique de ces conditions sur une longue durée, en général au moins **30 ans** : moyennes et variabilité des températures, des précipitations, des vents. Une vague de froid ne contredit donc pas un réchauffement climatique : il faut comparer des moyennes sur des décennies.

Les mesures instrumentales directes ne couvrent que les deux derniers siècles environ. Pour remonter plus loin, on utilise des **indicateurs paléoclimatiques** : des traces enregistrées dans des archives naturelles (glaces, sédiments marins et lacustres, tourbières, coraux, cernes des arbres, roches). Leur interprétation repose sur le **principe d'actualisme** : les relations observées aujourd'hui entre un indicateur et le climat (exigences écologiques d'une plante, comportement des isotopes) étaient les mêmes dans le passé.

2. Le thermomètre isotopique

2.1. Les isotopes de l'oxygène et le $\delta^{18}\text{O}$

L'oxygène possède deux isotopes stables principaux : ^{16}O (environ 99,8 %) et ^{18}O (environ 0,2 %). Une molécule d'eau H_2^{18}O est plus lourde que H_2^{16}O . On exprime la composition d'un échantillon par son $\delta^{18}\text{O}$, écart relatif de son rapport isotopique $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ à celui d'un standard (l'eau océanique moyenne actuelle), en pour mille (‰) :

$$\delta^{18}\text{O} = (R \text{ échantillon} / R \text{ standard} - 1) \times 1\,000$$

Un $\delta^{18}\text{O}$ négatif signifie que l'échantillon est appauvri en ^{18}O par rapport au standard.

2.2. Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires

Deux phénomènes appauvrissent la neige polaire en ^{18}O :

- à l'**évaporation**, les molécules légères H_2^{16}O passent plus facilement en vapeur : la vapeur est appauvrie en ^{18}O par rapport à l'océan ;
- au cours du transport vers les pôles, la vapeur se refroidit et se **condense** : les molécules lourdes H_2^{18}O précipitent en premier. La vapeur restante s'appauvrit de plus en plus en ^{18}O .

Plus il fait **froid**, plus la condensation a été poussée avant d'atteindre le pôle, et plus la neige est appauvrie en ^{18}O . Le $\delta^{18}\text{O}$ de la neige (puis de la glace) est donc d'autant plus **bas** que la température était basse. Au Groenland, on observe une relation à peu près linéaire, de l'ordre de 0,7 ‰ par degré. Le deutérium (δD) se comporte de la même façon et est utilisé en Antarctique.

Les forages de glace en Antarctique (Vostok, EPICA Dôme C) couvrent environ **800 000 ans**. La glace est datée par comptage de couches annuelles (dans sa partie récente), par des modèles d'écoulement et par des repères (cendres volcaniques).

2.3. Le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates marins

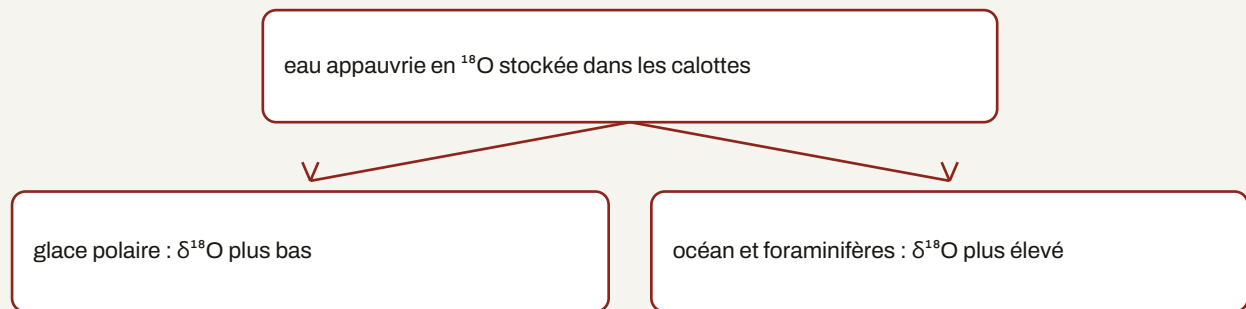
Les **foraminifères**, organismes unicellulaires marins, construisent un test (coquille) en carbonate de calcium avec l'oxygène de l'eau de mer. Leur $\delta^{18}\text{O}$ dépend :

- de la **composition de l'océan** : pendant une glaciation, d'énormes calottes de glace stockent de l'eau appauvrie en ^{18}O ; l'eau qui reste dans l'océan est donc **enrichie** en ^{18}O ;
- de la **température de l'eau** : plus l'eau est froide, plus le carbonate incorpore de ^{18}O .

Les deux effets vont dans le même sens : en période glaciaire, le $\delta^{18}\text{O}$ des **foraminifères augmente**. Les sédiments marins couvrent des millions d'années.

Les deux thermomètres varient en sens contraire : en période froide, le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces diminue, celui des carbonates marins augmente. C'est le piège le plus classique du chapitre.

$\delta^{18}\text{O}$ pendant une glaciation



Deux branches distinctes • ce schéma ne relie pas les deux issues entre elles

2.4. Les bulles d'air des glaces

Lors de la transformation de la neige en glace, des **bulles d'air** sont piégées. Elles conservent un échantillon de l'atmosphère ancienne, ce qui permet de mesurer directement les teneurs passées en CO_2 et en CH_4 . L'air d'une bulle est un peu plus jeune que la glace qui l'entoure, car la neige reste poreuse sur plusieurs dizaines de mètres avant la fermeture des bulles.

3. Les autres indicateurs

3.1. Les pollens

Le **grain de pollen** possède une paroi externe très résistante (elle se conserve des milliers d'années dans les sédiments sans oxygène des lacs et des tourbières) et une forme caractéristique du genre de plante qui l'a produit. Les pollens se déposent chaque année. Dans une carotte de sédiment, on compte, à chaque profondeur, les grains de chaque type et on calcule leurs **pourcentages** : on obtient un **diagramme pollinique**.

Grâce à l'actualisme, on en déduit la végétation, puis le climat : une forte proportion de **graminées** et d'armoises (steppe) indique un climat froid et sec ; des **pins** et des bouleaux, un climat froid à tempéré ; des **chênes**, des tilleuls et des noisetiers (forêt de feuillus), un climat tempéré et humide. Les niveaux sont datés au carbone 14 (matière organique du sédiment).

3.2. Les indices géologiques et biologiques

- Les **glaciers** laissent des **moraines** (dépôts de débris non triés), des **blocs erratiques** transportés loin de leur origine, des roches **striées** et des vallées en U. Leur présence dans une région aujourd'hui tempérée indique une extension passée des glaces.
- Les roches sédimentaires indiquent des climats anciens : **tillites** (moraines fossiles) pour un climat glaciaire, **charbons** pour des forêts humides, **évaaporites** (sel, gypse) pour un climat chaud et sec, **réécifs coralliens** pour des mers chaudes et peu profondes.
- Les **fossiles** d'êtres vivants aux exigences connues (coraux, palmiers, faune froide) complètent ces indices.

La concordance de plusieurs indicateurs indépendants renforce une reconstitution.

4. Les cycles glaciaires du Quaternaire

4.1. Ce que montrent les archives

Depuis environ 800 000 ans, le climat alterne entre des **périodes glaciaires** longues (de l'ordre de 80 000 à 100 000 ans), pendant lesquelles de grandes calottes recouvrent le nord de l'Amérique et de l'Europe, et des **périodes interglaciaires** plus courtes (de l'ordre de 10 000 à 30 000 ans), comme celle que nous vivons depuis environ **11 700 ans** (l'Holocène). La période des cycles est d'environ **100 000 ans** ; avant un million d'années environ, elle était d'environ 41 000 ans.

Au **dernier maximum glaciaire**, il y a environ 21 000 ans :

- la température moyenne mondiale était inférieure d'environ 5 à 7 °C à celle de l'époque préindustrielle ;
- le **niveau de la mer** était plus bas d'environ 120 m, l'eau étant stockée dans les calottes ;
- la teneur en CO₂ atmosphérique était d'environ **180 ppm**, contre environ 280 ppm pendant les interglaciaires.

Les courbes de température (δD ou $\delta^{18}O$ des glaces) et de CO₂ varient **ensemble** sur 800 000 ans : cette corrélation montre un lien étroit entre carbone et climat.

4.2. Le moteur : les paramètres orbitaux

La quantité d'énergie solaire reçue en été aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord varie avec trois paramètres de l'orbite et de l'axe de la Terre (théorie astronomique de Milankovitch) :

Paramètre	Ce qui varie	Période approximative
Excentricité	forme plus ou moins allongée de l'orbite	100 000 et 400 000 ans
Obliquité	inclinaison de l'axe de rotation, entre 22,1° et 24,5°	41 000 ans
Précession	orientation de l'axe, qui décale les saisons par rapport au périhélie	19 000 à 23 000 ans

Quand les étés boréaux sont frais, la neige de l'hiver ne fond pas complètement aux hautes latitudes : les calottes peuvent grandir. Ces variations de l'ensoleillement sont le **déclencheur** (forçage) des entrées et sorties de glaciation.

4.3. Des rétroactions qui amplifient

Les variations orbitales, à elles seules, sont trop faibles pour expliquer l'ampleur des changements. Elles sont **amplifiées** par des **rétroactions positives** :

- **albédo** : la glace et la neige réfléchissent beaucoup le rayonnement solaire ; plus de glace signifie plus de réflexion, donc plus de refroidissement, donc plus de glace ;
- **CO₂** : un océan plus froid dissout davantage de CO₂ et la circulation océanique en stocke plus en profondeur ; moins de CO₂ dans l'atmosphère renforce le refroidissement ;
- **vapeur d'eau** : une atmosphère plus froide contient moins de vapeur d'eau, elle-même gaz à effet de serre.

Une **rétroaction positive** amplifie la perturbation initiale ; une **rétroaction négative** l'atténue (par exemple, une Terre plus chaude émet plus de rayonnement infrarouge vers l'espace, ce qui limite le réchauffement).

5. Les climats plus anciens

Sur des millions d'années, le climat dépend aussi de facteurs géologiques : position des continents (un continent sur un pôle favorise une calotte), ouverture ou fermeture de passages océaniques, et surtout teneur en CO_2 , contrôlée par l'équilibre entre :

- le **volcanisme** et le dégazage aux dorsales et dans les zones de subduction, qui libèrent du CO_2 ;
- l'**altération des roches silicatées** (granites, basaltes) par l'eau chargée de CO_2 , qui consomme du CO_2 ; les ions produits sont transportés à l'océan, où ils précipitent sous forme de carbonates ;
- le **stockage de matière organique** dans les sédiments (charbon, pétrole).

Exemples : au **Crétacé** (vers 100 Ma), climat chaud, pas de calottes permanentes, CO_2 élevé lié à une intense activité des dorsales. À la fin du **Carbonifère** et au Permien (vers 300 Ma), une glaciation s'étend sur le Gondwana, au pôle Sud, alors que l'enfouissement massif de matière organique (charbons) et l'altération de la chaîne hercynienne abaissent le CO_2 . Au Protérozoïque (vers 700 Ma), la Terre a connu des glaciations jusqu'aux basses latitudes.

6. L'effet de serre

6.1. Le bilan radiatif de la Terre

La Terre reçoit du Soleil un rayonnement principalement visible. En moyenne sur toute la surface du globe et sur l'année, le sommet de l'atmosphère reçoit environ $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Environ 30 % de ce rayonnement est réfléchi vers l'espace par les nuages, les aérosols et les surfaces claires : c'est l'**albédo** moyen de la Terre, $A \approx 0,30$. Les 70 % restants (environ $240 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) sont absorbés par l'atmosphère et surtout par la surface, qui s'échauffe.

La surface réémet de l'énergie sous forme de **rayonnement infrarouge** (IR). À l'équilibre, la Terre émet vers l'espace autant d'énergie qu'elle en absorbe.

6.2. Le rôle des gaz à effet de serre

Certains gaz de l'atmosphère, transparents au rayonnement visible, **absorbent le rayonnement infrarouge** émis par la surface puis le réémettent dans toutes les directions, en particulier vers le sol. La surface reçoit ainsi, en plus du rayonnement solaire, un rayonnement infrarouge venu de l'atmosphère : elle se réchauffe jusqu'à un nouvel équilibre. C'est l'**effet de serre**.

Sans effet de serre, la température moyenne de surface serait d'environ -18°C ; elle est d'environ $+15^\circ\text{C}$. L'effet de serre naturel est donc indispensable à la vie telle que nous la connaissons. Le problème actuel est son **renforcement**.

Les principaux **gaz à effet de serre** (GES) : la **vapeur d'eau** (H_2O , le plus abondant, dont la teneur dépend de la température), le **dioxyde de carbone** (CO_2), le **méthane** (CH_4), le **protoxyde d'azote** (N_2O), l'ozone et des gaz fluorés industriels. Leur effet se compare par le **pouvoir de réchauffement global** (PRG), rapporté à celui du CO_2 sur 100 ans : $\text{PRG}(\text{CO}_2) = 1$, $\text{PRG}(\text{CH}_4) \approx 28$, $\text{PRG}(\text{N}_2\text{O}) \approx 270$. Le méthane est plus puissant, mais il reste une dizaine d'années dans l'atmosphère, tandis qu'une partie du CO_2 émis y reste des siècles à des millénaires.

Une modification du bilan (hausse des GES, baisse de l'albédo) crée un **forçage radiatif**, exprimé en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$: positif, il réchauffe le climat.

Effet de serre

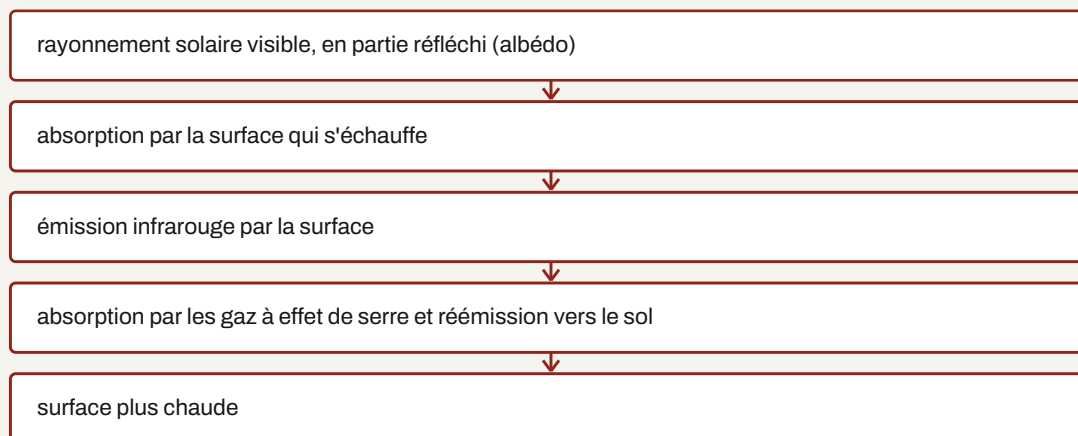


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

7. Le cycle du carbone

7.1. Réservoirs et flux

Le carbone circule entre plusieurs **réservoirs**. Ordres de grandeur, en gigatonnes de carbone (1 GtC = 10^{12} kg de carbone) :

Réservoir	Stock (GtC, ordre de grandeur)	Forme du carbone
Atmosphère	870 aujourd'hui (590 avant l'ère industrielle)	CO_2 , CH_4
Végétation	450	matière organique
Sols et pergélisol	3 000	matière organique
Océan	38 000	surtout ions hydrogénocarbonate HCO_3^-
Combustibles fossiles	environ 1 000 (réserves exploitables)	charbon, pétrole, gaz
Roches sédimentaires	plusieurs dizaines de millions	carbonates, matière organique dispersée

Les **flux** naturels sont importants mais à peu près équilibrés sur l'année : la **photosynthèse** prélève environ 120 à 140 GtC par an à l'atmosphère, la **respiration** et la décomposition en restituent autant ; l'**océan** échange environ 80 à 90 GtC par an avec l'atmosphère dans chaque sens (dissolution du CO_2 , dégazage). Le cycle long (altération, sédimentation, volcanisme) échange des flux minuscules, de l'ordre de 0,1 à 0,2 GtC par an, mais sur des millions d'années.

Le **temps de résidence** d'un réservoir est le rapport stock / flux sortant : quelques années pour le carbone de l'atmosphère échangé avec la biosphère, des siècles pour l'océan profond, des millions d'années pour les roches.

7.2. La perturbation humaine

Les activités humaines transfèrent vers l'atmosphère du carbone stocké depuis des millions d'années :

- combustion du charbon, du pétrole et du gaz, et production de ciment : environ **10 GtC par an** dans les années 2010 ;
- **déforestation** et changements d'usage des sols : environ 1 GtC par an ;
- s'y ajoutent le méthane (élevage de ruminants, rizières, décharges, fuites de gaz) et le protoxyde d'azote (engrais azotés).

Ce flux est petit devant les flux naturels, mais il est à **sens unique** et s'accumule. Environ **45 %** du carbone émis reste dans l'atmosphère ; le reste est absorbé par l'**océan** (environ un quart) et par la **végétation et les sols** (environ un quart à un tiers), qui jouent le rôle de **puits de carbone**. Pour l'atmosphère, 1 ppm de CO₂ correspond à environ **2,12 GtC**.

Conséquences : la teneur en CO₂ est passée d'environ **280 ppm** avant 1850 à plus de **420 ppm** au milieu des années 2020, valeur jamais atteinte depuis au moins 800 000 ans (et sans doute bien plus). Le méthane est passé d'environ 700 à plus de 1 900 ppb. Le CO₂ dissous dans l'océan forme de l'acide carbonique : le pH de surface a baissé d'environ 0,1 unité depuis l'ère préindustrielle (**acidification des océans**), ce qui gêne les organismes à squelette calcaire (coraux, ptéropodes, certains foraminifères).

Deux arguments montrent que ce CO₂ supplémentaire vient des combustibles fossiles : il est **appauvri en ¹³C** (signature de la matière organique) et **dépourvu de ¹⁴C** (le carbone fossile, vieux de millions d'années, n'en contient plus) ; et la teneur en O₂ de l'air diminue au rythme attendu pour une combustion.

Perturbation du cycle du carbone

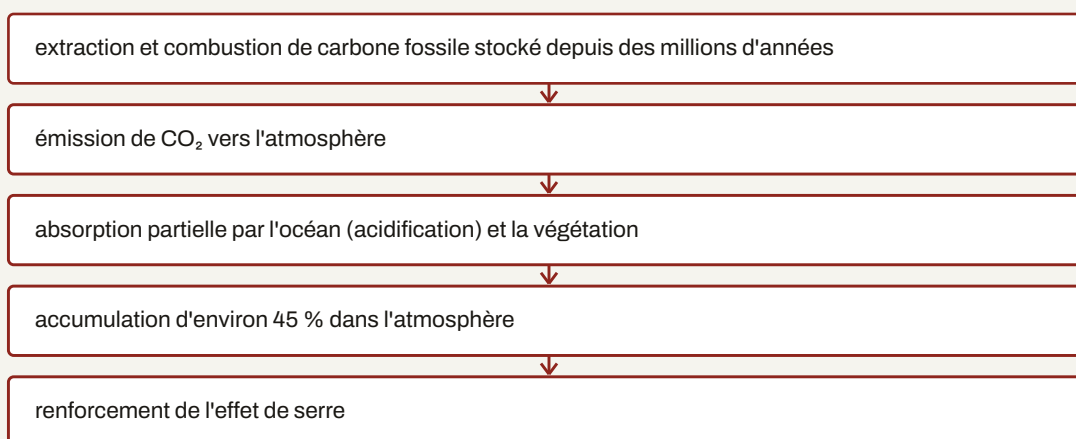


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

8. Le changement climatique actuel

8.1. Les observations

Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) synthétise les travaux scientifiques publiés. Son rapport de 2021 établit notamment :

- la température moyenne à la surface du globe a augmenté d'environ **1,1 °C** entre 1850-1900 et 2011-2020, et le réchauffement se poursuit ; il est plus fort sur les continents et aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord ;
- le **niveau moyen de la mer** a monté d'environ **20 cm** entre 1901 et 2018, à un rythme qui s'accélère (environ 3,7 mm par an entre 2006 et 2018), par **dilatation thermique** de l'océan qui se réchauffe et par **fonte des glaciers et des calottes** du Groenland et de l'Antarctique (la fonte de la banquise, déjà flottante, ne fait presque pas monter le niveau) ;
- recul quasi généralisé des glaciers de montagne, diminution de la banquise arctique en été, dégel du pergélisol ;
- augmentation de la fréquence et de l'intensité de certains extrêmes : vagues de chaleur, précipitations intenses, sécheresses dans certaines régions ;
- déplacement des aires de répartition de nombreuses espèces vers les pôles et en altitude, avancée des dates de floraison.

8.2. L'attribution aux activités humaines

Le GIEC conclut qu'il est **sans équivoque** que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et les terres. Les arguments : les causes naturelles (activité solaire, volcanisme, paramètres orbitaux) ne peuvent pas expliquer le réchauffement observé, tandis que les modèles qui intègrent les émissions humaines le reproduisent ; la haute atmosphère (stratosphère) se refroidit pendant que la basse atmosphère se réchauffe, signature d'un renforcement de l'effet de serre et non d'une hausse de l'activité solaire ; la vitesse du changement actuel est sans commune mesure avec celle des sorties de glaciation (environ 5 °C en 10 000 ans).

8.3. Les projections

Les **modèles climatiques** simulent l'évolution du climat selon des **scénarios** d'émissions. Pour la période 2081-2100, les meilleures estimations du réchauffement par rapport à 1850-1900 vont d'environ **1,4 °C** pour un scénario d'émissions très faibles à environ **4,4 °C** pour un scénario d'émissions très élevées. Le réchauffement à long terme dépend surtout du **cumul** des émissions de CO₂ : pour stabiliser la température, il faut atteindre la **neutralité carbone** (émissions nettes nulles). L'**accord de Paris** (2015) vise à contenir le réchauffement nettement en dessous de 2 °C et à poursuivre les efforts pour le limiter à 1,5 °C.

Certaines conséquences sont **irréversibles** à l'échelle humaine : la hausse du niveau de la mer se poursuivra pendant des siècles, même après la stabilisation des températures, à cause de l'inertie de l'océan et des calottes.

9. Atténuation et adaptation

Deux types de réponses, complémentaires, sont distinguées.

L'**atténuation** agit sur les **causes** : réduire les émissions de GES ou augmenter les puits.

- **Sobriété** : réduire les besoins (moins de déplacements carbonés, isolation, alimentation moins riche en viande de ruminants).
- **Efficacité** : faire la même chose avec moins d'énergie (moteurs, bâtiments, procédés).
- **Énergies bas carbone** : remplacer les combustibles fossiles par l'électricité produite à partir des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) ou du nucléaire.
- **Puits de carbone** : protéger et restaurer forêts, sols, zones humides ; captage et stockage géologique du CO_2 , encore limités.
- Réduction du méthane (fuites, élevage, déchets), particulièrement efficace à court terme puisque sa durée de vie est courte.

L'adaptation agit sur les **conséquences** : réduire la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes au changement déjà engagé.

- Protection des côtes (digues, recul organisé des constructions, restauration des mangroves et des dunes).
- Agriculture : variétés résistantes à la sécheresse, gestion économe de l'eau, diversification des cultures.
- Villes : végétalisation contre les îlots de chaleur, plans d'alerte lors des canicules, gestion des eaux pluviales.
- Gestion des forêts avec des essences adaptées au climat futur.

Certaines mesures servent les deux objectifs (restaurer une zone humide stocke du carbone et limite les inondations). D'autres peuvent mal s'adapter (climatiser massivement augmente la consommation d'énergie) : on parle de **maladaptation**.

Exemples résolus

Exemple 1 : estimer une variation de température à partir du $\delta^{18}\text{O}$ d'une glace

Document. Dans une carotte de glace du Groenland, on mesure : $\delta^{18}\text{O} = -35\text{‰}$ dans une glace datée de 5 000 ans (Holocène) ; $\delta^{18}\text{O} = -42\text{‰}$ dans une glace datée de 21 000 ans. On admet la relation $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = 0,7 \times \Delta T$ (δ en ‰, T en $^{\circ}\text{C}$).

Questions. a) Indiquer laquelle des deux glaces s'est formée sous le climat le plus froid. b) Calculer l'écart de température entre les deux périodes. c) Indiquer à quelle période climatique correspond la glace de 21 000 ans.

Résolution. a) La glace de 21 000 ans a le $\delta^{18}\text{O}$ le plus bas (-42‰ contre -35‰) : elle est la plus appauvrie en ^{18}O . Or plus il fait froid, plus la neige est appauvrie en ^{18}O . **La glace de 21 000 ans s'est formée sous le climat le plus froid.** b) $\Delta(\delta^{18}\text{O}) = -42 - (-35) = -7\text{‰}$. $\Delta T = -7 / 0,7 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$: il faisait environ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de moins au Groenland qu'à l'Holocène. c) 21 000 ans correspond au **dernier maximum glaciaire**. L'écart local de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ est plus grand que l'écart moyen mondial ($5\text{ à }7\text{ }^{\circ}\text{C}$), car le refroidissement est amplifié aux hautes latitudes.

Exemple 2 : exploiter un diagramme pollinique

Document. Carotte prélevée dans une tourbière des Vosges. Pourcentages des pollens (les autres types sont négligeables).

Profondeur (âge ¹⁴ C)	Graminées et armoises	Pins et bouleaux	Chênes, tilleuls, noisetiers
6,0 m (15 000 ans)	75 %	20 %	5 %
4,5 m (11 000 ans)	30 %	60 %	10 %
2,5 m (7 000 ans)	10 %	25 %	65 %
0,5 m (1 000 ans)	15 %	20 %	65 %

Questions. a) Décrire l'évolution de la végétation. b) En déduire l'évolution du climat. c) Indiquer le principe qui fonde ce raisonnement et une limite.

Résolution. a) Il y a 15 000 ans, les plantes herbacées de steppe dominant (75 %) : paysage ouvert. Vers 11 000 ans, pins et bouleaux deviennent majoritaires (60 %) : forêt de conifères et de bouleaux. Dès 7 000 ans, chênes, tilleuls et noisetiers dominant (65 %) : forêt de feuillus, stable jusqu'à l'actuel. b) Les exigences actuelles de ces plantes indiquent un climat **froid et sec** il y a 15 000 ans (fin de la dernière glaciation), un **réchauffement** vers 11 000 ans, puis un climat **tempéré et humide** depuis au moins 7 000 ans. **On reconnaît la sortie de la dernière glaciation et l'installation de l'interglaciaire actuel (Holocène).** c) Le raisonnement repose sur l'**actualisme** : les plantes avaient dans le passé les mêmes exigences climatiques qu'aujourd'hui. Limites : les pollens de pin, légers, sont transportés loin par le vent et peuvent être surreprésentés ; la végétation réagit au climat avec un décalage (temps de migration des arbres) ; les activités humaines (défrichements) modifient la végétation récente, ce qui peut expliquer la légère hausse des herbacées vers 1 000 ans.

Exemple 3 : établir un bilan du carbone anthropique

Document. Valeurs moyennes annuelles arrondies sur une décennie récente : émissions dues aux combustibles fossiles et au ciment : 9,6 GtC ; émissions dues aux changements d'usage des sols : 1,3 GtC ; hausse du CO₂ atmosphérique : 2,45 ppm par an ; absorption par l'océan : 2,9 GtC. On donne 1 ppm = 2,12 GtC.

Questions. a) Calculer les émissions totales et la masse de carbone accumulée chaque année dans l'atmosphère. b) En déduire l'absorption par la végétation et les sols. c) Calculer la fraction des émissions qui reste dans l'atmosphère, puis convertir les émissions totales en masse de CO₂.

Résolution. a) Émissions totales : 9,6 + 1,3 = **10,9 GtC par an**. Accumulation atmosphérique : 2,45 × 2,12 ≈ **5,2 GtC par an**. b) Le carbone émis se répartit entre atmosphère, océan et continents : 10,9 = 5,2 + 2,9 + puits continental, d'où puits continental = 10,9 – 5,2 – 2,9 = **2,8 GtC par an**. c) Fraction atmosphérique : 5,2 / 10,9 ≈ **0,48, soit environ 48 %**. Conversion : une mole de CO₂ (44 g) contient une mole de C (12 g) ; m(CO₂) = 10,9 × 44 / 12 ≈ **40 Gt de CO₂ par an**.

Méthodes et pièges

- Pour un indicateur isotopique, précisez toujours de quelle archive il s'agit : glace (δ¹⁸O bas = froid) ou carbonate marin (δ¹⁸O haut = froid).
- Ne confonds pas météo et climat : un épisode isolé ne prouve ni ne réfute une tendance climatique, il faut des moyennes sur au moins 30 ans.

- Dans un diagramme pollinique, raisonne sur des **pourcentages** et sur des **groupes** de plantes aux exigences connues, puis conclus sur le climat en citant l'actualisme.
- Les paramètres orbitaux déclenchent les glaciations, les rétroactions (albédo, CO_2 , vapeur d'eau) les amplifient : ne présente pas l'un sans l'autre.
- L'effet de serre est naturel et indispensable ; ce qui pose problème est son **renforcement** par les émissions humaines.
- Le trou de la couche d'ozone et l'effet de serre sont deux problèmes distincts : ne les mélange pas.
- La fonte de la banquise ne fait presque pas monter la mer ; celle des glaciers et calottes posés sur les continents, si.
- Vérifie les unités du carbone : GtC (masse de carbone) ou Gt de CO_2 (facteur $44/12 \approx 3,67$).
- Atténuation = agir sur les causes (émissions, puits) ; adaptation = agir sur les conséquences (vulnérabilité). Classe chaque mesure en te posant cette question.

Vers le PASS

En PASS, le climat n'est pas un cours en soi, mais ses conséquences sont étudiées en **santé publique** et en **santé environnementale** : effets des vagues de chaleur sur la mortalité, en particulier chez les personnes âgées, extension de l'aire des moustiques vecteurs de maladies (dengue, chikungunya), pollution de l'air, impacts sur l'alimentation et l'accès à l'eau. Tu y apprendras à raisonner en exposition, dose, risque relatif et risque attribuable, à partir d'études épidémiologiques. Les outils de ce chapitre (lecture de courbes, ordres de grandeur, distinction corrélation et causalité, raisonnement sur des scénarios) y sont directement réutilisés.

Suite en PASS : Santé environnementale : exposition, dose et risque

Exercices

Niveau 1 : s'entraîner

1. Définis : climat, albédo, gaz à effet de serre, puits de carbone, rétroaction positive.
2. Un échantillon de glace a un rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de 0,0019660 ; le standard a un rapport de 0,0020052. Calcule son $\delta^{18}\text{O}$ et indique s'il est enrichi ou appauvri en ^{18}O par rapport au standard.
3. Le sommet de l'atmosphère reçoit en moyenne $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. a) Avec un albédo de 0,30, calcule la puissance réfléchie et la puissance absorbée par mètre carré. b) Explique l'effet d'une diminution de l'albédo due à la fonte de la neige et de la glace.
4. Classe chaque mesure en atténuation ou en adaptation : a) isoler les logements ; b) construire une digue ; c) développer l'éolien ; d) planter des variétés de blé résistantes à la sécheresse ; e) restaurer une tourbière ; f) mettre en place un plan d'alerte canicule.
5. La teneur en CO_2 est passée de 280 ppm à 420 ppm. Avec $1 \text{ ppm} = 2,12 \text{ GtC}$, calcule la masse de carbone ajoutée à l'atmosphère, puis la masse de CO_2 correspondante.

Niveau 2 : type bac

6. Données d'une carotte de glace antarctique (valeurs simplifiées) : il y a 420 000 ans : $\delta D = -430 \text{ ‰}$, $CO_2 = 280 \text{ ppm}$; 350 000 ans : -480 ‰ , 190 ppm ; 330 000 ans : -425 ‰ , 290 ppm ; 250 000 ans : -480 ‰ , 185 ppm ; 240 000 ans : -430 ‰ , 280 ppm ; 140 000 ans : -485 ‰ , 190 ppm ; 125 000 ans : -420 ‰ , 285 ppm ; 20 000 ans : -480 ‰ , 185 ppm ; 5 000 ans : -430 ‰ , 265 ppm . a) Identifie les périodes glaciaires et interglaciaires. b) Estime la durée moyenne d'un cycle. c) Décris la relation entre δD et CO_2 et propose une interprétation. d) Indique le paramètre orbital dont la période correspond à ce cycle.
7. Dans une carotte marine, le $\delta^{18}O$ des foraminifères vaut $+3,2 \text{ ‰}$ dans un niveau daté de 125 000 ans et $+5,0 \text{ ‰}$ dans un niveau daté de 20 000 ans. a) Indique le niveau formé pendant la période la plus froide, en justifiant par les deux effets qui contrôlent le $\delta^{18}O$ des carbonates. b) Explique pourquoi les variations du $\delta^{18}O$ des glaces et des carbonates marins sont de sens opposé. c) Montre que ces résultats sont cohérents avec ceux de l'exercice 6.
8. Un élevage émet chaque année 2,5 t de méthane et 400 t de CO_2 . a) Avec un PRG du méthane de 28, calcule les émissions en équivalent CO_2 . b) Indique la part du méthane dans le total. c) Explique pourquoi réduire le méthane a un effet rapide sur le climat, mais ne dispense pas de réduire le CO_2 .
9. a) Explique comment les variations de l'obliquité modifient l'ensoleillement estival aux hautes latitudes. b) Explique pourquoi un été boréal frais favorise une entrée en glaciation. c) Montre, à l'aide de deux rétroactions, comment un faible forçage orbital aboutit à un changement climatique important.

Niveau 3 : vers le PASS

10. La température d'équilibre radiatif d'une planète sans effet de serre vérifie $\sigma T^4 = S(1 - A)/4$, avec $S = 1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. a) Calcule T pour $A = 0,30$, en kelvins et en degrés Celsius. b) Compare à la température moyenne observée ($+15 \text{ °C}$) et conclus. c) Calcule T pour $A = 0,32$ et interprète l'effet d'une hausse de l'albédo.
11. QCM (une ou plusieurs réponses exactes). A. En période glaciaire, le $\delta^{18}O$ des glaces polaires est plus faible qu'en période interglaciaire. B. La fonte de la banquise arctique est la principale cause de la hausse du niveau des mers. C. Environ 45 % du CO_2 émis par les activités humaines reste dans l'atmosphère. D. Le CO_2 issu des combustibles fossiles ne contient pas de carbone 14. E. Construire une digue est une mesure d'atténuation.
12. La calotte du Groenland représente environ $2,9 \times 10^6 \text{ km}^3$ de glace, de masse volumique $917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. La surface des océans est d'environ $3,61 \times 10^8 \text{ km}^2$. a) Calcule la hausse du niveau marin si toute cette glace fondait (on néglige l'effet de la forme des côtes). b) Par ailleurs, on estime le coefficient de dilatation thermique de l'eau de mer à $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Calcule la hausse du niveau marin due au réchauffement de $0,3 \text{ °C}$ d'une couche d'océan de 700 m d'épaisseur. c) Compare ces deux contributions en termes d'ampleur et de vitesse.
13. On suppose que les émissions restent de 11 GtC par an et que 45 % restent dans l'atmosphère. a) Calcule la hausse annuelle de la teneur en CO_2 (en ppm par an). b) Calcule le nombre d'années pour passer de 420 ppm au double de la valeur préindustrielle (560 ppm). c) Explique pourquoi la fraction qui reste dans l'atmosphère pourrait augmenter si le réchauffement se poursuit.

Corrigés

1. **Climat** : description statistique (moyennes et variabilité) des conditions atmosphériques d'une région sur une longue durée, au moins 30 ans. **Albédo** : fraction du rayonnement solaire incident réfléchi par une surface ou par la planète, entre 0 et 1. **Gaz à effet de serre** : gaz transparent au rayonnement visible qui absorbe le rayonnement infrarouge émis par la surface et le réémet en partie vers elle (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O). **Puits de carbone** : réservoir qui absorbe plus de carbone qu'il n'en libère (océan, forêts en croissance, sols). **Rétroaction positive** : mécanisme par lequel l'effet d'une perturbation amplifie cette perturbation (fonte de la glace, baisse de l'albédo, réchauffement accru).
2. $\delta^{18}\text{O} = (0,0019660 / 0,0020052 - 1) \times 1\,000 = (0,98045 - 1) \times 1\,000 \approx -19,5 \text{ ‰}$. La valeur est négative : l'échantillon est **appauvri en ^{18}O** par rapport au standard, comme toute glace polaire.
3. a) Puissance réfléchi : $0,30 \times 340 = 102 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Puissance absorbée : $340 - 102 = 238 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
b) Une surface libérée de neige ou de glace est plus sombre (sol, eau libre) : l'albédo diminue, donc la Terre **absorbe davantage** d'énergie et se réchauffe, ce qui fait fondre encore plus de glace. C'est une **rétroaction positive**.
4. **Atténuation** : a) isoler les logements, c) développer l'éolien, e) restaurer une tourbière (elle stocke du carbone ; elle limite aussi les crues, donc sert aussi l'adaptation). **Adaptation** : b) construire une digue, d) variétés de blé résistantes à la sécheresse, f) plan d'alerte caniculaire.
5. Hausse : $420 - 280 = 140 \text{ ppm}$. Masse de carbone : $140 \times 2,12 \approx 297 \text{ GtC}$. Masse de CO_2 : $297 \times 44 / 12 \approx 1,09 \times 10^3 \text{ Gt de CO}_2$, soit environ 1 090 milliards de tonnes.
6. a) Les valeurs de δD les plus basses (-480 à -485 ‰) indiquent les périodes les plus froides : **glaciaires vers 350 000, 250 000, 140 000 et 20 000 ans**. Les valeurs les plus hautes (-420 à -430 ‰) indiquent les **interglaciaires vers 420 000, 330 000, 240 000, 125 000 ans et l'actuel (5 000 ans)**.
b) Intervalles entre interglaciaires : $420\,000 - 330\,000 = 90\,000$; $330\,000 - 240\,000 = 90\,000$; $240\,000 - 125\,000 = 115\,000$; $125\,000 - 5\,000 = 120\,000$ ans. Moyenne : $(90\,000 + 90\,000 + 115\,000 + 120\,000) / 4 \approx 104\,000$ ans, soit environ **100 000 ans**. c) Le CO_2 est bas (185 à 190 ppm) quand δD est bas, et haut (265 à 290 ppm) quand δD est haut : **les deux grandeurs varient ensemble**. Interprétation : pendant les glaciations, l'océan froid stocke plus de CO_2 ; la baisse du CO_2 diminue l'effet de serre et amplifie le refroidissement, et inversement lors des déglaciations. La corrélation ne dit pas à elle seule quel facteur précède l'autre : le CO_2 agit ici comme une **rétroaction**, le déclencheur étant orbital. d) Un cycle d'environ 100 000 ans correspond à la période de l'**excentricité** de l'orbite terrestre.
7. a) Le niveau de 20 000 ans a le $\delta^{18}\text{O}$ le plus élevé ($+5,0 \text{ ‰}$). En période froide, d'une part les calottes stockent de l'eau appauvrie en ^{18}O , ce qui **enrichit l'océan en ^{18}O** ; d'autre part une eau plus froide fait incorporer **plus de ^{18}O** au carbonate. Le niveau de 20 000 ans correspond à la période la plus froide (dernier maximum glaciaire).
b) L'eau appauvrie en ^{18}O par l'évaporation et la condensation se retrouve dans la glace ; l'océan, qui a perdu cette eau légère, s'enrichit. **Ce que la glace perd en ^{18}O , l'océan le garde** : les variations sont de sens opposé. c) À 125 000 ans, l'exercice 6 montre un interglaciaire (δD élevé, CO_2 285 ppm) ; à 20 000 ans, un glaciaire (δD bas, CO_2 185 ppm). **Les deux archives indépendantes concordent**, ce qui renforce la reconstitution.
8. a) Méthane : $2,5 \times 28 = 70 \text{ t éq. CO}_2$. Total : $400 + 70 = 470 \text{ t éq. CO}_2$ par an.

b) Part du méthane : $70 / 470 \approx 15 \%$. c) Le méthane ne reste qu'une dizaine d'années dans l'atmosphère : réduire ses émissions fait baisser sa concentration, donc son effet, **en quelques décennies**. Mais une partie du CO_2 émis reste des siècles à des millénaires et son effet s'accumule : **la température à long terme dépend du cumul de CO_2** , qu'il faut ramener à des émissions nettes nulles.

9. a) Quand l'obliquité augmente, les pôles sont plus inclinés vers le Soleil en été : **l'ensoleillement estival aux hautes latitudes augmente** et les saisons sont plus contrastées. Quand elle diminue, les étés des hautes latitudes reçoivent moins d'énergie.

b) Pendant un été frais, la neige tombée l'hiver ne fond pas entièrement : elle **s'accumule d'année en année** et forme des calottes. Un hiver froid ne suffit pas, c'est la fonte estivale qui limite les glaciers. c) La neige accumulée augmente l'**albédo** : plus de rayonnement réfléchi, refroidissement accru, plus de neige. L'océan refroidi dissout plus de CO_2 : l'effet de serre diminue, le refroidissement s'accroît. **Ces rétroactions positives amplifient un forçage initial faible** jusqu'à une glaciation.

10. a) $T^4 = 1\,361 \times 0,70 / (4 \times 5,67 \times 10^{-8}) = 952,7 / (2,268 \times 10^{-7}) \approx 4,20 \times 10^9 \text{ K}^4$; $T = (4,20 \times 10^9)^{1/4} \approx 255 \text{ K}$, **soit environ -18°C** .

b) La température observée est de $+15^\circ\text{C}$, soit 288 K : l'écart d'environ 33°C est dû à l'**effet de serre naturel** de l'atmosphère. Sans lui, la surface serait en grande partie gelée. c) $T^4 = 1\,361 \times 0,68 / (2,268 \times 10^{-7}) \approx 4,08 \times 10^9 \text{ K}^4$; $T \approx 253 \text{ K}$, **soit environ -20°C** . Une hausse de l'albédo de $0,02$ abaisse la température d'équilibre d'environ 2°C : **l'albédo est un levier puissant du climat**, ce qui explique le rôle de la rétroaction glace-albédo.

11. **Réponses exactes : A, C, D.** A : vrai, glace plus appauvrie en ^{18}O par temps froid. B : faux, la banquise flotte déjà ; la hausse vient de la dilatation thermique et de la fonte des glaciers et calottes continentales. C : vrai. D : vrai, le carbone fossile, vieux de millions d'années, n'a plus de ^{14}C . E : faux, une digue agit sur les conséquences : c'est une mesure d'adaptation.

12. a) Volume de glace : $2,9 \times 10^6 \text{ km}^3 = 2,9 \times 10^{15} \text{ m}^3$. Masse : $2,9 \times 10^{15} \times 917 \approx 2,66 \times 10^{18} \text{ kg}$, soit un volume d'eau liquide de $2,66 \times 10^{15} \text{ m}^3$ (masse volumique de l'eau $1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Surface des océans : $3,61 \times 10^8 \text{ km}^2 = 3,61 \times 10^{14} \text{ m}^2$. Hausse : $2,66 \times 10^{15} / 3,61 \times 10^{14} \approx 7,4 \text{ m}$.

b) $\Delta h = \alpha \times h \times \Delta T = 2 \times 10^{-4} \times 700 \times 0,3 = 0,042 \text{ m}$, **soit environ 4 cm**. c) **La fonte complète du Groenland aurait un effet environ 175 fois plus grand**, mais elle demanderait des siècles à des millénaires, tandis que la dilatation thermique agit dès maintenant, sur des décennies. À l'échelle du siècle, les deux contributions sont du même ordre de grandeur ; à long terme, la fonte des calottes domine.

13. a) Carbone accumulé par an : $11 \times 0,45 = 4,95 \text{ GtC}$; en ppm : $4,95 / 2,12 \approx 2,3 \text{ ppm par an}$.

b) Hausse nécessaire : $560 - 420 = 140 \text{ ppm}$, soit $140 \times 2,12 = 296,8 \text{ GtC}$. Durée : $296,8 / 4,95 \approx 60 \text{ ans}$. c) Les puits faiblissent avec le réchauffement : un océan plus chaud dissout **moins de CO_2** (et s'acidifie, ce qui réduit sa capacité d'absorption), la végétation souffre des sécheresses et des incendies, et les sols et le pergélisol qui dégèlent **libèrent** du carbone. **La fraction qui reste dans l'atmosphère augmenterait alors : c'est une rétroaction positive du cycle du carbone.**