



POUR BIEN COMMENCER

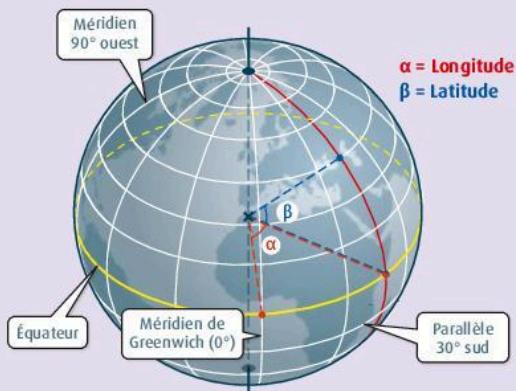
Quelques notions clés

ES 1^{re} Distances terrestres

$$L_m = P_{eq} \approx 40\,000 \text{ km}$$

→ L_m : longueur d'un méridien → P_{eq} : périmètre à l'équateur

Les méridiens divisent la Terre en 360°	Les parallèles divisent chaque moitié de Terre en 180°
1° de longitude à l'équateur vaut $P_{eq} = \frac{40\,000}{360} \approx 111 \text{ km}$	1° de latitude vaut $\frac{L_m}{180} \approx 111 \text{ km}$



PC Cycle 4 pH et acidité d'une solution

L'acidité d'une solution aqueuse est directement liée à la concentration en ions hydronium H_3O^+ , formés par association entre une molécule d'eau (H_2O) et un ion hydrogène (H^+).

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}^+]$$

Plus la concentration en H_3O^+ est élevée, plus le pH est faible et donc plus la solution est acide.



Se tester avant de démarrer

Savez-vous répondre aux questions suivantes ?

- Quelle est la conséquence d'un forçage radiatif positif sur la température moyenne terrestre ?
- Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?
- Sachant que la dissolution de CO_2 dans l'eau s'accompagne d'une libération d'ions H^+ , comment évolue le pH d'une eau dans laquelle on dissout du CO_2 ?

Marche pour le climat à Barcelone. En septembre 2019, des marches pour le climat sont organisées dans le monde entier. Ces manifestations visent à demander des actions pour lutter contre le réchauffement climatique. Ici, des lycéennes manifestent à Barcelone en Espagne.

CHAPITRE

3

LE CLIMAT DU FUTUR



Comment les scientifiques modélisent-ils le système climatique et comment concluent-ils à une responsabilité humaine dans son évolution ?

Modéliser le climat de la Terre

L'étude du changement climatique soulève des questions complexes pour lesquelles la démarche expérimentale classique ne suffit pas. Pour décrire les climats du passé et du futur, les climatologues utilisent des modélisations numériques.

Quels sont les éléments communs aux différents modèles numériques du climat ?



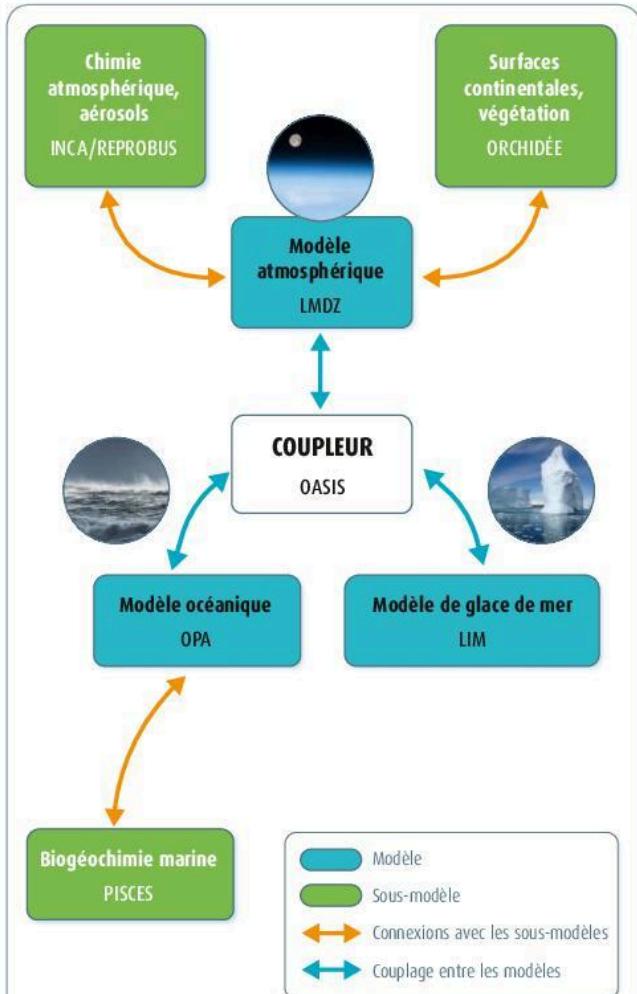
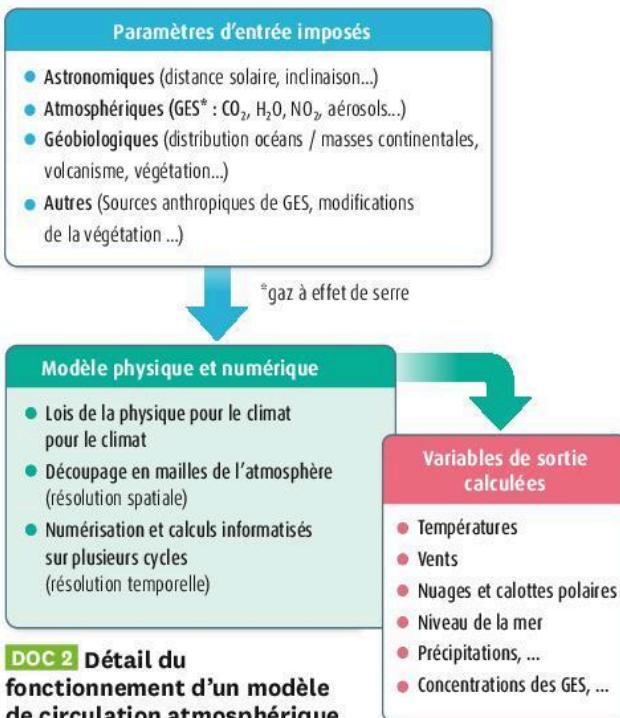
Vidéo sur la modélisation du climat



Interview de Jean-Louis Dufresne, climatologue au Laboratoire de Météorologie Dynamique

Un modèle numérique de climat, c'est un programme informatique dont l'objectif est de reproduire le climat d'une Terre virtuelle, c'est à dire de simuler les mêmes phénomènes climatiques que sur la vraie Terre. Cette simulation se fait à partir des équations de la physique atmosphérique et océanique, mais aussi de la façon dont se comporte la végétation sur les surfaces continentales, etc. Toutes ces lois physiques ou chimiques sont mises sous forme d'équations mathématiques avant d'être résolues par des programmes informatiques qui tournent sur des supercalculateurs. Ces programmes informatiques appelés modèles numériques du climat permettent de simuler le climat sur des dizaines voire des centaines de milliers d'années. Ces simulations diffèrent des simulations météorologiques qui utilisent des modèles comparables mais dont l'objectif est la prévision du temps à court terme. Pour les projections climatiques, il ne s'agit pas de prévoir le temps qu'il fera tel jour dans cent ans, mais de prédire le climat, c'est-à-dire la distribution statistique des variables météorologiques sur plusieurs décennies.

DOC 1 Qu'est qu'un modèle climatique numérique ?



Les climatologues utilisent différents modèles climatiques appelés «modèles globaux du climat». Chacun est une combinaison de différents modèles (de l'atmosphère, des océans, des continents et des glaces) identifiés par des sigles (ex.: LMDZ). Ces modèles peuvent eux-mêmes être associés à des sous-modèles traitant de composantes spécifiques, comme par exemple du comportement des fines particules de l'atmosphère (aérosol). Le coupleur est un logiciel permettant des échanges synchronisés d'informations: les données en sortie d'un modèle servent en partie de données d'entrée pour un autre. Plusieurs dizaines de modèles globaux du climat coexistent dans le monde, chacun différent selon l'expertise des chercheurs qui les ont développés.

DOC 3 Schéma simplifié des composantes d'un modèle climatique de l'Institut Pierre-Simon Laplace.

SIMCLIMAT

Simclimat est un logiciel pédagogique, conçu en 2007 par des climatologues (dont Camille Risi, voir [DOC. 2 p. 66](#)). Il permet de calculer des variables climatiques dans le temps, en fonction de paramètres d'entrée astronomiques et atmosphériques choisis par l'utilisateur. Ce dernier peut aussi modifier les rétroactions climatiques en jeu. Les variables de sortie sont calculées d'après les lois physico-chimiques. Ce modèle, bien que scientifiquement rigoureux, est très simplifié par rapport aux modèles actuels des climatologues qui nécessitent une grande puissance de calcul ([► Unité 2](#)). Par exemple, la Terre est ici modélisée par un point unique, c'est-à-dire que les variables observées sont supposées identiques sur toute la Terre.

Protocole et tableau



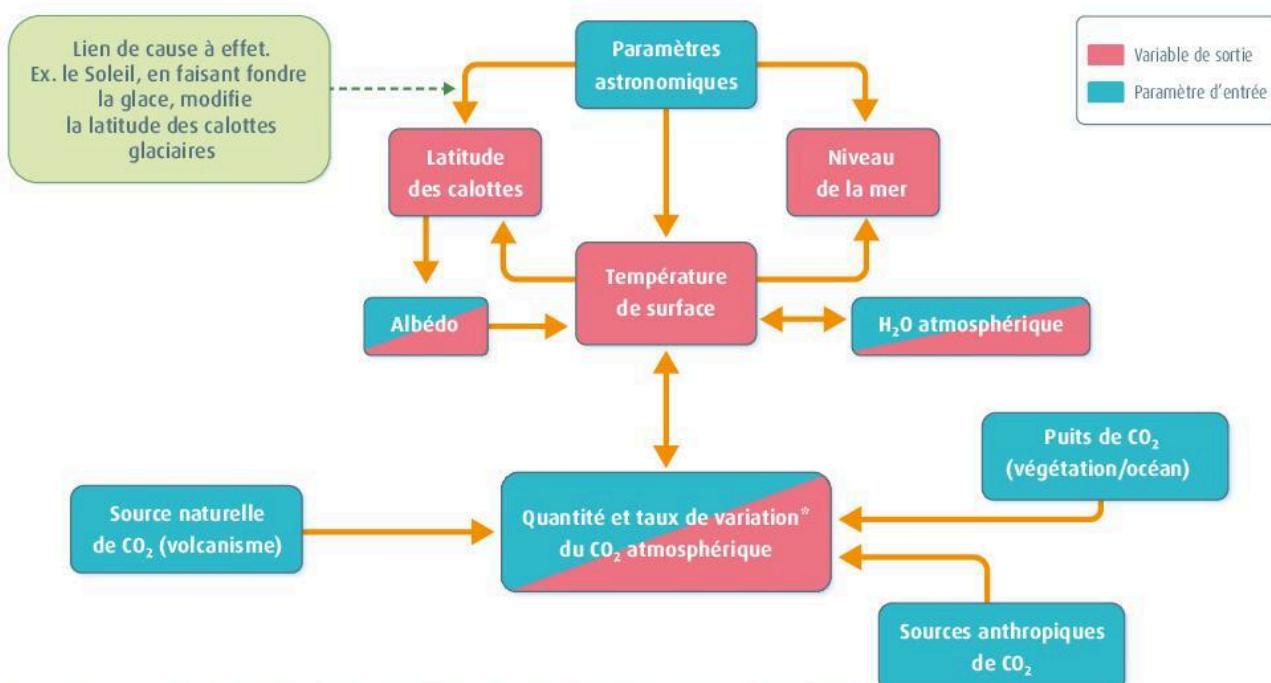
UTILISATION DE SIMCLIMAT

- Par groupe de 4, réalisez les simulations du protocole numérique.
- Complétez le tableau de données numériques avec les prédictions des variables pour 2100.

DOC 4 Simclimat: un modèle climatique pédagogique.

Les paramètres à la fois rouge et bleu peuvent être, selon les scénarios mis en œuvre, des paramètres d'entrée ou des variables de sortie. Par exemple, l'albédo peut être fixé à 30 % comme paramètre d'entrée par l'utilisateur. Dans d'autres scénarios

où l'albédo n'est pas déterminé en entrée, une augmentation de température conduit à une fonte des glaces et donc à une baisse de l'albédo. Dans ce cas, l'albédo est une variable de sortie du modèle.



*Le taux de variation du CO₂ reflète son émission par les sources de CO₂ et son absorption par les puits de CO₂

DOC 5 Relations entre les paramètres d'entrée et les variables de sortie de Simclimat.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

1. Après avoir indiqué les éléments-clés d'un modèle numérique du climat ([DOCS 1 à 3](#)), retrouvez ces caractéristiques dans le logiciel Simclimat ([DOCS 4 et 5](#)).
2. Indiquez les paramètres qui influencent la température de surface dans Simclimat. Indiquez comment la température de surface agit sur l'albédo ([DOC. 5](#)).
3. Une fois le tableau numérique des simulations rempli ([DOC. 4](#)), interprétez les résultats obtenus.
Pour cela, identifiez les boucles de rétroaction et les paramètres affectés dans chaque simulation ([DOC. 5](#)).

ESPRIT CRITIQUE

Il existe plusieurs modèles climatiques différents dans le monde.

→ Cette diversité des modèles vous semble-t-elle un atout ou un inconvénient pour la prédiction des climats du futur?

Pistes de travail ► [UNITÉ 3 p. 68-69](#)

Le modèle Simclimat utilisé représente la Terre comme un point unique.

→ Cette représentation vous paraît-elle réaliste ? D'après-vous, tous les modèles climatiques font-ils des simplifications ?

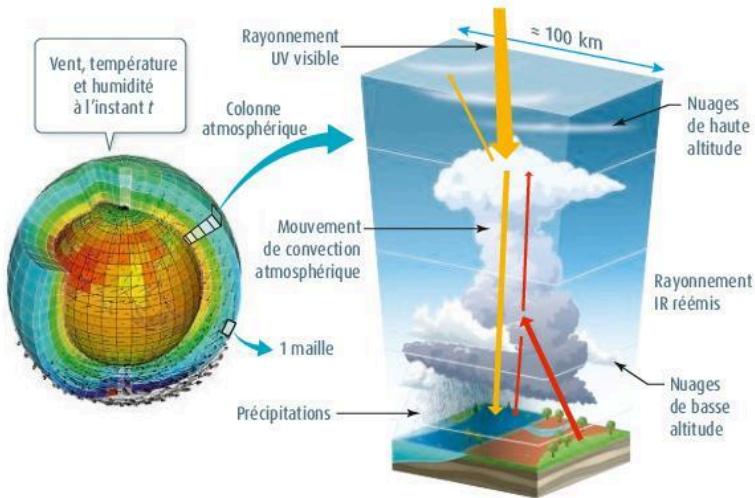
Pistes de travail ► [UNITÉ 3 p. 68 \(DOC. 2\)](#)

Les caractéristiques des modèles climatiques

L'unité 1 présente une architecture commune à tous les modèles climatiques. Il existe cependant une diversité de modèles qui reflètent les choix des chercheurs qui les développent. Ces choix sont imposés entre autres par une puissance de calcul limitée.

Comment les chercheurs modélisent-ils la complexité du climat et comment évaluent-ils la fiabilité de leurs modèles ?

L'atmosphère est découpée numériquement en un quadrillage tridimensionnel appelé maillage. La modélisation de l'atmosphère consiste à calculer les variables de sortie (vent, température, humidité, etc.) à chaque pas de temps et pour chaque maille. Le pas de temps, durée qui s'écoule entre deux calculs, est de l'ordre de quelques minutes. Il définit la résolution temporelle du modèle tandis que la largeur de la maille définit la résolution spatiale, ici de l'ordre de 100 km. Les phénomènes physiques complexes ayant une échelle inférieure à la taille de la maille (comme la formation des nuages) sont traités de manière statistique. Cette simplification incontournable est une source de variabilité entre les modèles (Unité 3 p. 68).



DOC 1 Exemple d'un modèle atmosphérique utilisé à l'Institut Pierre-Simon Laplace.



Interview de Camille Risi, climatologue au Laboratoire de Météorologie Dynamique

Si on avait une puissance de calcul infinie, on réduirait la taille des mailles jusqu'à pouvoir représenter le plus finement possible les processus nuageux. À la résolution actuelle, il faut déjà environ 360 points en longitude, multiplié par 180 points en latitude, que multiplient environ 50 points sur la verticale. Le pas de temps est de l'ordre de quelques minutes (15 min) mais les calculs portent sur plusieurs milliers d'années voire des centaines de milliers d'années... Ça fait $360 \times 180 \times 50 \times 100\,000 \times (365 \times 24 \times 4)$ fois tous les calculs atmosphériques! C'est pourquoi les simulations avec les modèles de climat se font sur des supercalculateurs de centres nationaux et certaines simulations prennent plusieurs mois.



Build your own earth (BYOE) est une application pédagogique en ligne qui met à disposition les résultats enregistrés d'un modèle global de simulation climatique (Fast Ocean Atmospher Model: FOAM). Il permet d'afficher sur une carte un très grand nombre de variables de sortie en fonction de plus de 50 scénarios. Ces scénarios contiennent des paramètres d'entrée (concentration de gaz à effet de serre, albédo) imposés par les concepteurs. Contrairement à Simclimat, FOAM possède un maillage tridimensionnel. L'atmosphère est découpée en mailles: 40 en latitude, 48 en longitude, 18 niveaux d'altitude. Le pas de temps est de 30 minutes. Pour simuler 480 ans de climat, le programme doit tourner pendant environ 24h sur un supercalculateur.

DOC 3 Présentation de Build Your Own Earth (BYOE).

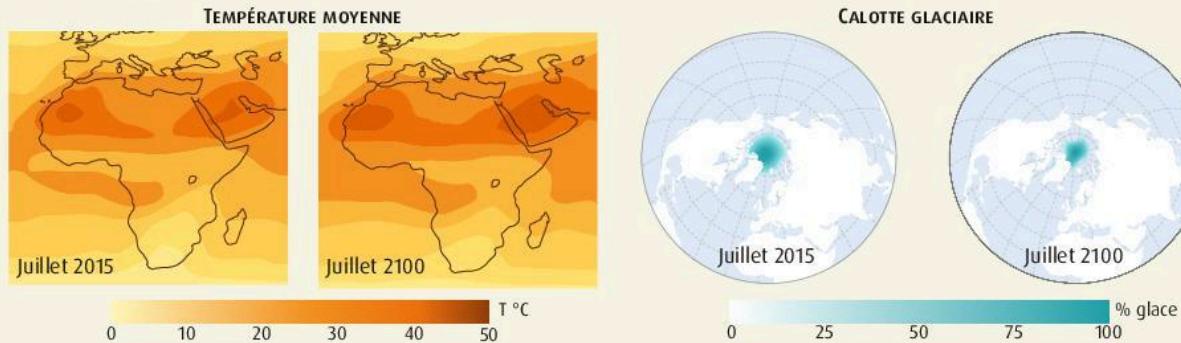
DOC 2 Puissance de calcul nécessaire.

Le supercalculateur Curie, hébergé dans un centre de recherche de la région parisienne, est capable d'effectuer jusqu'à 2 millions de milliards (2×10^{15}) d'opérations à la seconde.

Protocole pour BYOE



UTILISATION DE BYOE

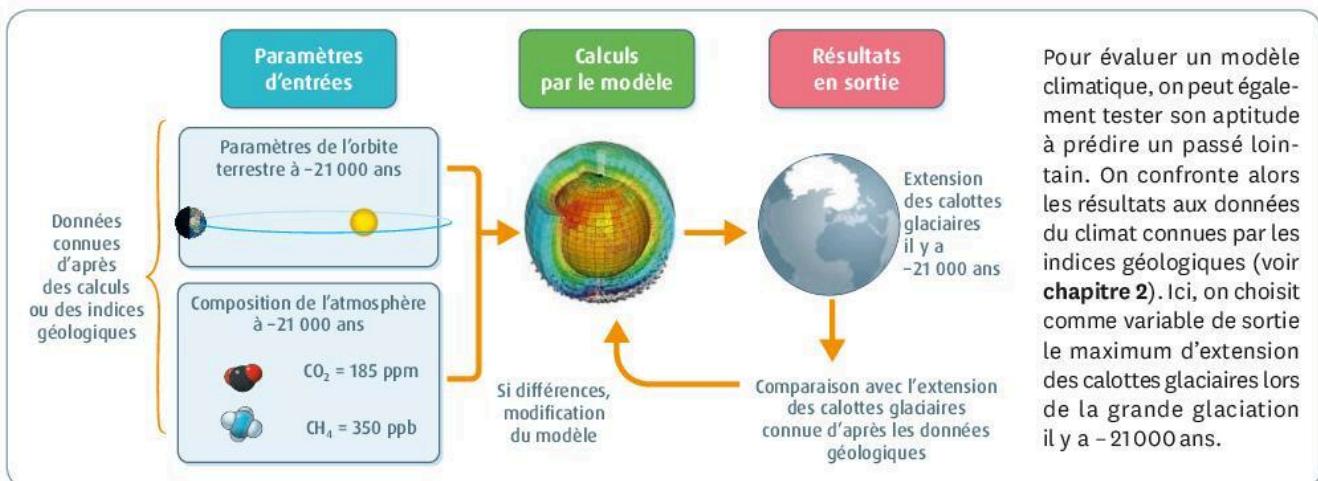


DOC 4 Exemples de résultats de simulations obtenus avec BYOE.

Pour évaluer les qualités prédictives d'un modèle climatique, on confronte ses résultats aux observations météorologiques actuelles, par exemple issues de données satellites. Ainsi, les satellites météorologiques observent les caractéristiques tridimensionnelles des nuages. Un modèle climatique peut simuler ces caractéristiques telles qu'elles seraient déterminées par des satellites volant au-dessus de l'atmosphère dans le cadre

du modèle. Si la comparaison des caractéristiques mesurées et simulées révèle un écart important, les chercheurs font évoluer le modèle afin réduire cet écart. Des approches de ce type permettent d'améliorer la capacité des modèles à rendre compte des perturbations dues aux activités humaines actuelles (déforestation, etc.).

DOC 5 Fiabilité des modèles pour simuler les situations actuelles.



DOC 6 Simulation de paléoclimats.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- Indiquez le rôle du maillage et ses conséquences sur la puissance de calcul (**docs 1 et 2**).
- Indiquez la différence entre BYOE et un modèle global de climat. Préciser pourquoi on ne peut pas utiliser en classe un « véritable » modèle climatique (**docs 1 à 3**).
- Calculer la taille d'une maille en degrés de longitude et de latitude. Convertissez ce résultat en km au niveau de l'équateur (**doc. 3 p. 62**).
- Analysez les résultats de vos simulations sur BYOE (**doc. 4**).
- Indiquez comment les climatologues évaluent la fiabilité de leurs modèles (**docs 5 et 6**).

ESPRIT CRITIQUE

Les modèles du climat sont en permanente évolution pour représenter le plus fidèlement possible la complexité du système climatique.

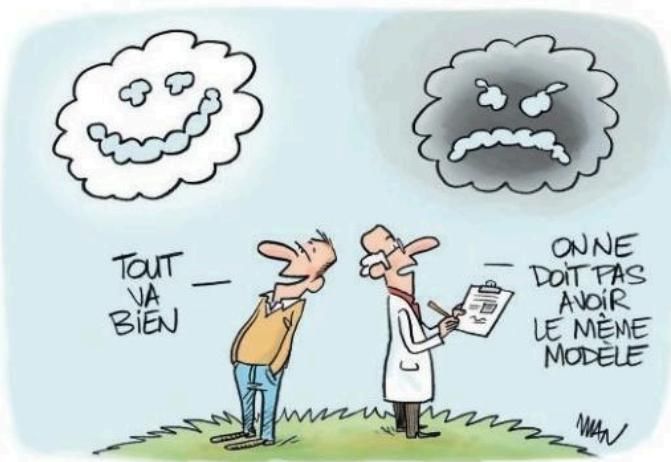
- Comment les climatologues évaluent-ils la fiabilité de leurs modèles ?

Vous répondrez dans un paragraphe de 5 lignes maximum (**docs 5 et 6**).

Variabilité et limites des modèles en science

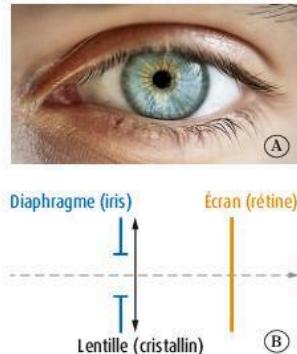
Une objection fréquente: les modèles, on peut leur faire dire beaucoup de choses. La preuve, d'un modèle à l'autre, ça peut changer du tout au tout...

VOTRE MISSION Préparez un exposé oral de 5 minutes pour discuter dans quelle mesure on peut faire confiance aux modèles malgré leur variabilité.



1. Deux modèles de l'œil.

Le mot « modèle » comporte beaucoup de sens. Ainsi, dans l'art, le modèle peut être un objet réel de référence **(A)** ou encore un concept. En science **(B)**, il est conçu comme un outil construit qui permet la mise en relation entre des données expérimentales et des constructions théoriques.



2. Les modèles en science : une pince pour attraper le monde !



Interview de Guillaume Lecointre, professeur du Muséum national d'Histoire naturelle

Le monde réel est changeant parce qu'il est matériel, à toutes ses échelles d'observation. Il n'y a pas deux pierres identiques à l'atome près. Pas deux nuages identiques à l'atome près. Chacune de nos cellules est unique, à la molécule ou à l'atome près. Qu'il s'agisse d'un nuage, de nos cellules, ou des individus biologiques, les systèmes complexes sont chargés d'une histoire qui fait leur unicité, et l'intrication des influences qu'ils subissent rend leur comportement partiellement imprévisible. Le monde mathématique qui sous-tend les modèles fonctionne comme une sorte de « pince » pour attraper le monde, un langage qui tente de réduire cette complexité (sans pour autant l'ignorer) pour mieux pouvoir en faire ressortir les influences et les connections, dans leurs grandes lignes. Autour de ces grandes lignes, il y a toujours de la variabilité. Les différents modèles utilisés pour explorer une question sont des façons différentes de s'en saisir. C'est un mode de recherche qui tente de trouver quels sont les meilleurs outils descripteurs du réel. Et il n'y a pas d'outil idéal: plusieurs outils sont envisageables, avec chacun leurs points forts et leurs points faibles... D'où l'existence de plusieurs modèles, des variations entre eux et des incertitudes qui en découlent. La coexistence de tous ces modèles et la prise en compte de leurs incertitudes permet de discuter, de comprendre, et participe donc à la construction d'un savoir scientifique. De manière ultime, ils servent aussi à prévoir.

3. Accords et désaccords entre modèles climatiques.



Interview de Camille Risi, climatologue au Laboratoire de Météorologie Dynamique

Les différents modèles du projet CMIP5 (**doc.5**) s'accordent sur certains aspects des projections climatiques. Ainsi, ils sont tous d'accord sur le fait que la Terre se réchauffe en réponse à une augmentation de CO₂. Tous s'accordent aussi sur l'aggravation des vagues de chaleur et sur l'assèchement du bassin méditerranéen. L'accord entre les modèles de CMIP5, combiné à notre compréhension physique des phénomènes en jeu et au fait que même des modèles très simples puissent reproduire ces résultats, nous donnent confiance dans ces aspects des projections. En revanche, les

modèles de CMIP5 sont en désaccord sur d'autres aspects des projections. Ainsi, le réchauffement global en réponse à un doublement de concentration atmosphérique en CO₂ varie entre 2,5 et 4,5 °C selon les modèles. Sur le Sahel, la moitié des modèles prévoit plus de pluie, l'autre moitié moins de pluie. La façon dont les nuages sont représentés dans les modèles est au cœur de ces désaccords. Notre confiance dans ces résultats divergents est très limitée. Il est possible d'avoir une bonne confiance dans certains aspects des projections climatiques, tout en ayant conscience des incertitudes sur d'autres aspects.

«La façon dont les nuages sont représentés dans les modèles est au cœur de certaines incertitudes sur le réchauffement global.» Camille Risi, climatologue

4. Savoir scientifique et incertitudes : ce n'est pas tabou !

Il n'existe pas d'instrument de mesure infiniment précis. Ainsi, un pèse-personne indiquant 71 kg ne signifie pas que la personne pèse 71 000 000 0 kg. Chaque instrument de mesure donne une estimation de la valeur mesurée : c'est l'incertitude de mesure. Le niveau de confiance est la probabilité que la valeur mesurée se trouve dans un certain intervalle, appelé l'intervalle de confiance. La modélisation quant à elle implique une simplification obligatoire : si on ne négligeait ou ne simplifiait rien, on ne pourrait rien faire. Ainsi, l'incertitude liée aux mesures ou à la modélisation est centrale en sciences. Un fait scientifique ne peut s'établir qu'en confrontant des mesures de différents opérateurs indépendants, et en les discutant. Comme il est impossible que deux mesures indépendantes soient exactement identiques, il faut donc connaître les incertitudes de chacune des mesures pour pouvoir conclure si elles sont compatibles. Pour chaque résultat publié, les scientifiques indiquent de façon transparente les incertitudes et le niveau de confiance : c'est ainsi que se construit le savoir scientifique.



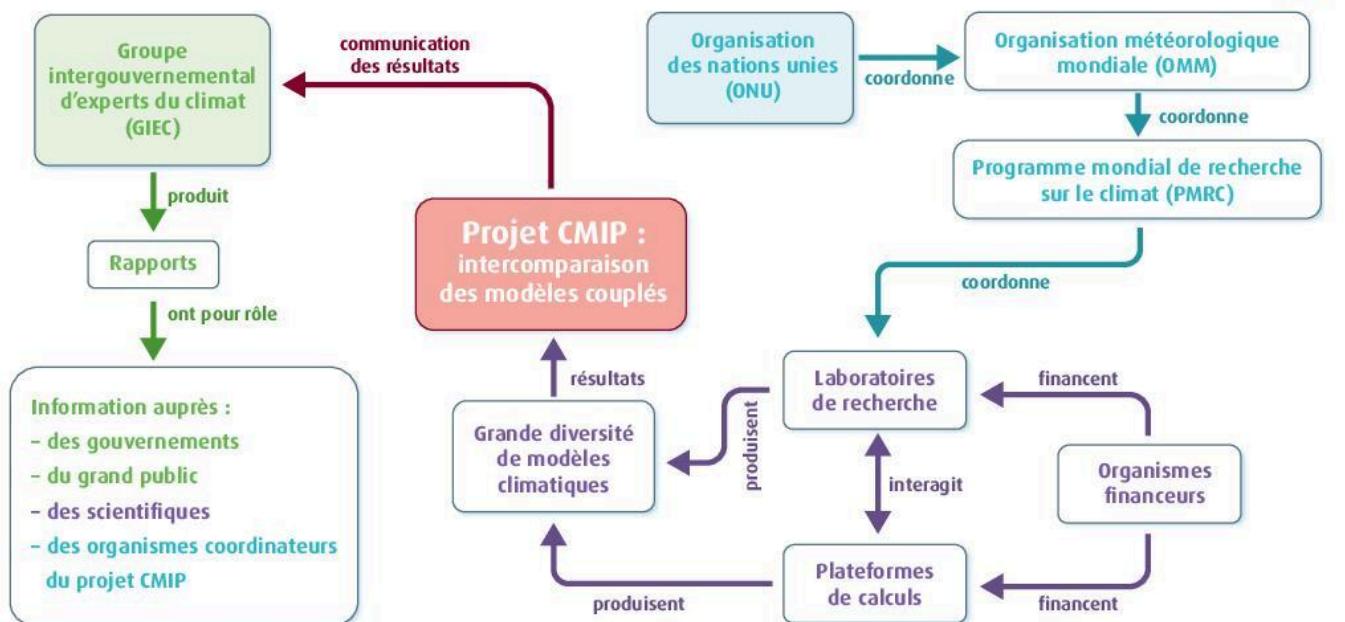
Rapport du GIEC 2013

Dans ce rapport, on lit la précision suivante : «La probabilité d'un résultat est indiquée selon les termes suivants : quasi-certain = 99-100 % de probabilité, très probable = 90-100 % de probabilité, probable = 66-100 % de probabilité, incertain = 33-66 % de probabilité, peu probable = 0-33 % de probabilité, très peu probable = 0-10 % de probabilité, très improbable = 0-1 % de probabilité.»

Les incertitudes en sciences



5. Les acteurs du climat.



AIDE POUR RÉUSSIR LA MISSION

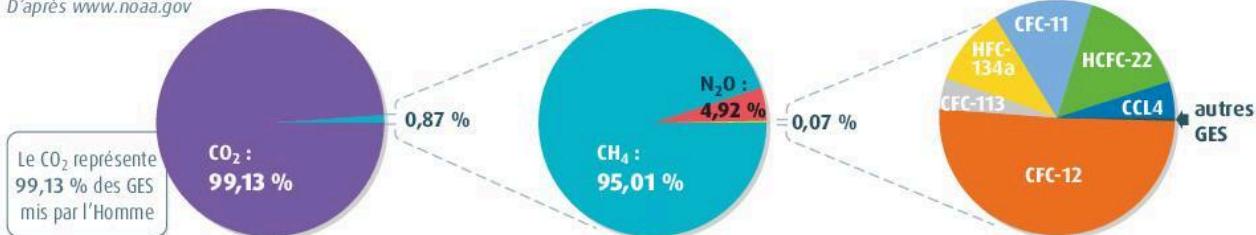
- Définissez ce qu'est un modèle en sciences (DOCS 1 et 2).
- Listez les limites des modèles climatiques que vous identifiez (DOCS 2 et 3).
- Expliquez en quoi les incertitudes liées à la modélisation du climat ne sont pas un obstacle et contribuent à construire un savoir scientifique (DOCS 4 et 5).

Les paramètres liés à l'activité humaine dans les modèles climatiques

Certaines activités humaines représentent des sources importantes de rejet de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et sont prises en compte dans les modèles de prédition climatique.

Quels sont les GES produits par les activités humaines et quelles sont les conséquences de ces émissions dans les modèles climatiques ?

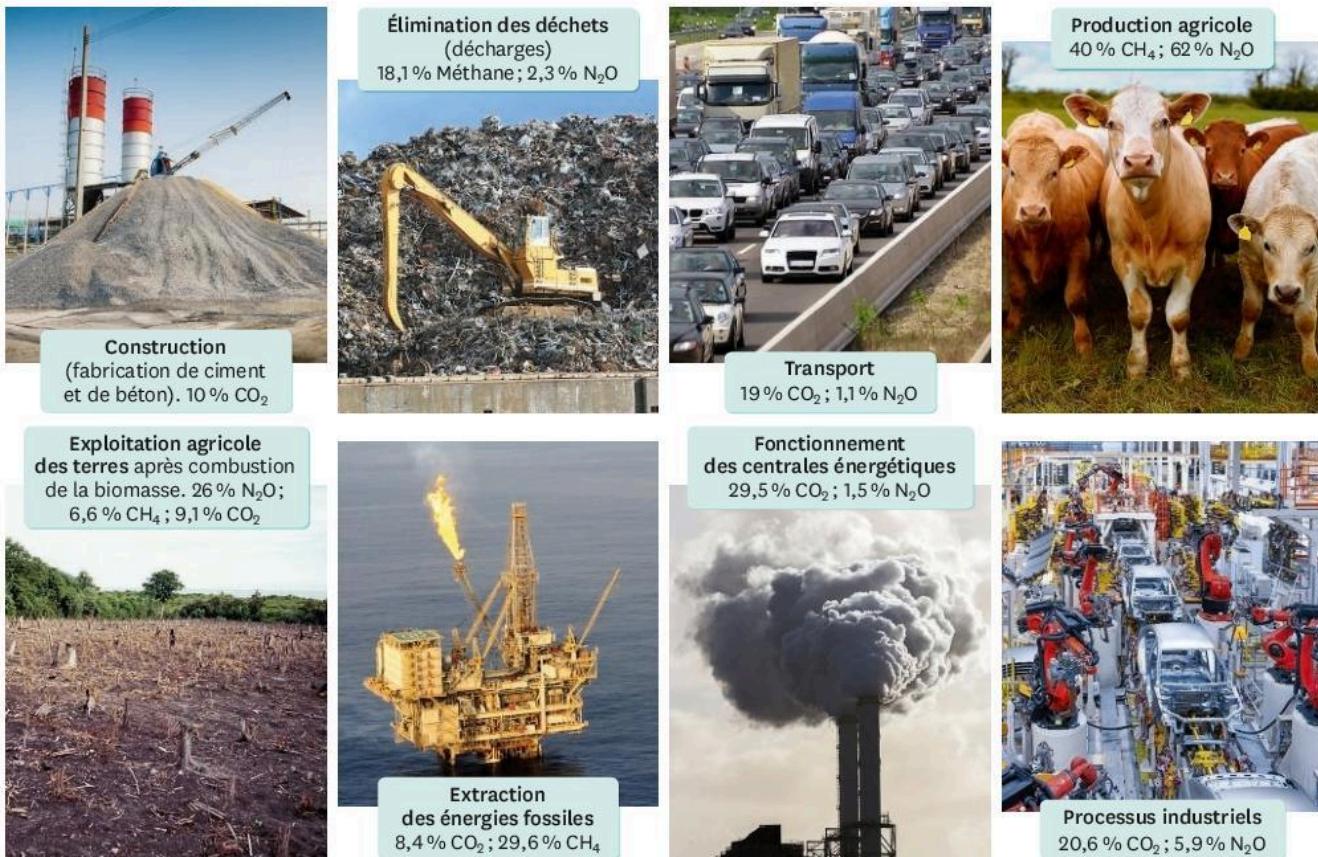
D'après www.noaa.gov



La vapeur d'eau n'est pas prise en compte car les activités humaines ne semblent pas avoir d'impact significatif direct sur la concentration en vapeur d'eau atmosphérique. Le réchauffement climatique va toutefois favoriser l'évaporation. Cette rétroaction positive n'est pas à négliger.

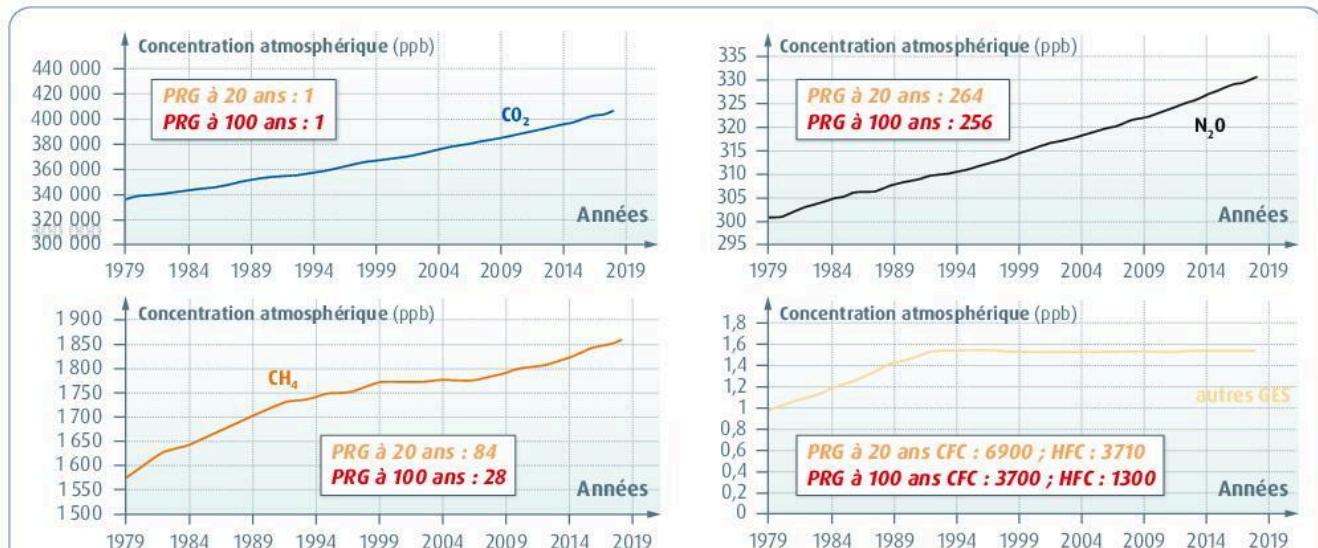
Le dernier camembert regroupe certains gaz fluorés utilisés par différents secteurs industriels. Bien qu'émis en très petite quantité, ils ont une longue espérance de vie dans l'atmosphère.

DOC 1 Proportion des différents GES d'origine anthropique dans l'atmosphère en 2018.



DOC 2 Origine des émissions de GES liées à l'activité humaine.

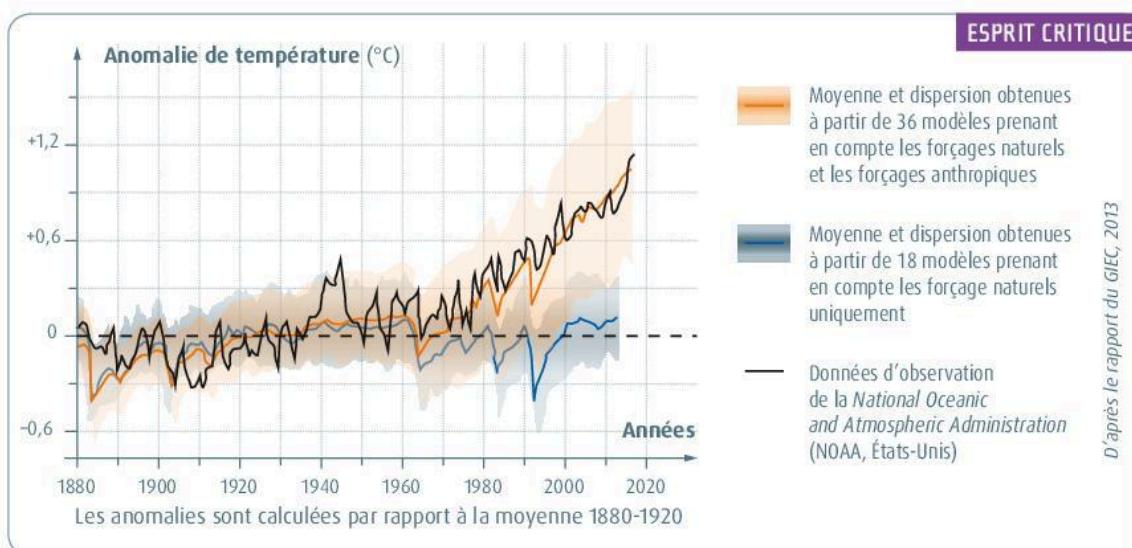
Les pourcentages correspondent à la contribution de chaque activité humaine dans l'émission des différents gaz à effet de serre. Par exemple, l'extraction des combustibles fossiles représente 8,4% des émissions anthropiques de CO₂ alors que la fabrication de ciment et de béton contribue à 10% de ces émissions.



Connaître la quantité émise de chaque GES est une donnée importante, mais elle doit être rapportée à l'impact réel de chaque type de gaz. Le PRG correspond au forçage radiatif sur 20 ou 100 ans rapporté au forçage radiatif induit par le CO₂.

Il traduit la « quantité d'effet de serre » et pas simplement une masse de gaz. Par exemple, le PRG à 100 ans du méthane est de 28, c'est-à-dire qu'un kilo de méthane aura en un siècle un impact sur le forçage radiatif 28 fois plus fort qu'un kilo de CO₂.

DOC 3 Évolution de la concentration atmosphérique des principaux GES de 1979 à 2019 et évaluation de leur pouvoir de réchauffement global (PRG). 1 ppb = 1 partie par milliard = 10⁻⁷ %. D'après www.noaa.gov



DOC 4 Modèles de « rétroprediction » de la température prenant en compte ou non les émissions de GES. Les comparaisons de modèles climatiques CMIP (Climate Model Intercomparison Project) ont été proposées par le GIEC, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (voir DOC. 5, p. 69). Le CMIP5, projet datant de 2013, intègre et compare les données de plus d'une trentaine de modèles climatiques.

EXPLOITER LES DOCUMENTS

- À l'aide d'une recherche internet, donnez la concentration atmosphérique actuelle des trois principaux gaz à effet de serre (DOC. 1).
- Donnez les principales sources d'émission de ces trois gaz (DOC. 2) et calculez leur vitesse d'accumulation moyenne dans l'atmosphère (en ppb par an) entre 1979 et 2018 (DOC. 3).
- À partir du DOC. 3, formulez une hypothèse sur l'effet de ces GES sur la température globale (DOC. 4).

ESPRIT CRITIQUE

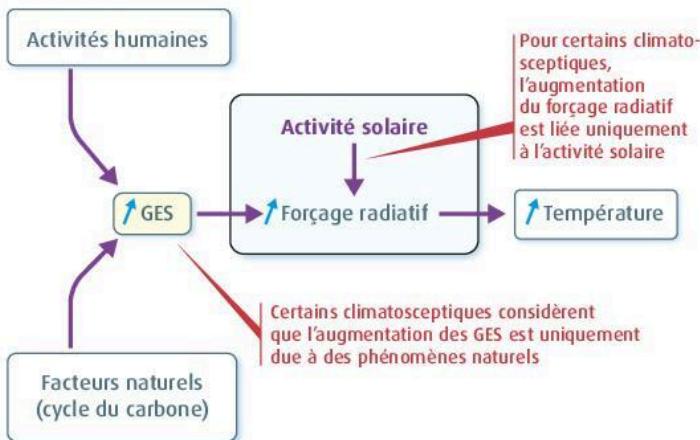
- Après avoir décrit et interprété le DOC. 4, quelle conclusion pouvez-vous en tirer?
- Ces résultats vous paraissent-ils suffisants pour conclure que l'homme est responsable du réchauffement climatique actuel?

Pistes de travail ► UNITÉ 5 p. 72

Climatoscepticisme : plongée au cœur de l'actualité

1. Climatoscepticisme : de quoi parle-t-on ?

Il existe plusieurs courants climatosceptiques. Avant d'entrer dans un débat, il est important de savoir où se situe la controverse.



Un débat d'actualité : la corrélation entre les émissions humaines de gaz à effet de serre et l'augmentation de la température mondiale est souvent le point de départ de la controverse climatosceptique.

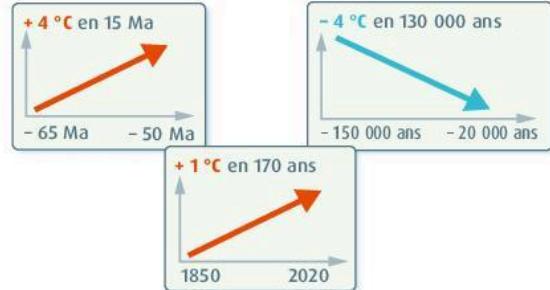
VOTRE MISSION Préparez un exposé oral de 5 minutes expliquant comment les scientifiques concluent à la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique.

2. Un exemple d'affirmation climatosceptique courant.

Autres arguments climatosceptiques



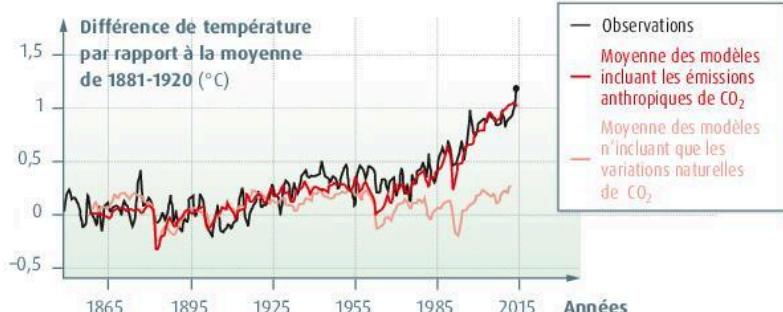
Les faits scientifiques



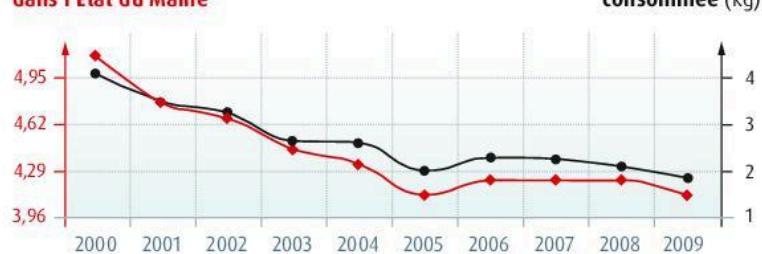
Affirmation climatosceptique

« Il n'y a pas de preuve qu'on soit sorti de la variabilité naturelle du climat. »

3. Deux exemples de corrélation.



Taux de divorce dans l'État du Maine



«S'appuyant sur une solide compréhension des mécanismes physiques en jeu, les climatologues concluent à la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique.»

4. Entre corrélation et causalité : les théories scientifiques.



Interview de Guillaume Lecointre, professeur au Muséum national d'Histoire naturelle

Pour passer d'une corrélation à une causalité, il faut une théorie scientifique explicative. On appelle une théorie scientifique un ensemble d'énoncés dont le rôle est d'organiser de manière cohérente des faits entre eux. Elle permet d'identifier des questions non résolues et d'émettre des hypothèses, voire de faire des prédictions sur ce qui n'a pas encore été observé. Une théorie n'est pas fermée, elle peut donner naissance à un nombre important d'hypothèses. Elle est aussi révisable : en découvrant de nouveaux faits, elle est parfois amenée à se corriger. Lorsque deux théories sont en compétition, on choisit généralement la plus parcimonieuse, c'est-à-dire celle qui explique le plus grand nombre de faits sans multiplier les hypothèses non documentées. Ainsi, c'est une théorie scientifique qui permet de passer d'une corrélation entre

les activités humaines et le réchauffement climatique à un lien de causalité : sachant les raisons physiques par lesquelles certains gaz de l'atmosphère augmentent la température, les gaz à effet de serre émis par les humains sont responsables de l'augmentation de température globale. La confiance des climatologues dans cette théorie s'appuie sur la concordance entre les différents modèles de climat, mais aussi sur une recherche longue et avancée permettant une bonne compréhension des mécanismes physiques en jeu.

**L'ACTIVITÉ HUMAINE
EST RESPONSABLE DU
CHANGEMENT CLIMATIQUE**

CONCLUSION :
**IL FAUT CESSER
DE S'ACTIVER**



5. Controverse scientifique ou publique ?

Interview de Guillaume Lecointre

La **controverse scientifique** est la démarche normale de discussion entre les membres de la communauté scientifique, lorsque des articles n'aboutissent pas à la même conclusion. En principe, la critique des idées ou des résultats n'est pas confondue avec la critique des personnes et les éléments de religion ou d'idéologie n'ont pas leur place dans le débat scientifique. La **controverse publique** est la discussion par le public de résultats scientifiques.

Les résultats des sciences appliquées et des technologies impliquent les sciences autant que la société. Les arguments scientifiques se mêlent à des valeurs, des contraintes économiques, sociologiques, politiques et culturelles.

La controverse sur le réchauffement climatique n'est donc pas une controverse scientifique, c'est une controverse publique. Par conséquent, les faits scientifiques deviennent difficiles à distinguer parmi des arguments d'ordre politique ou culturel. Par exemple, aux États-Unis, les mouvements climatosceptiques peuvent mobiliser l'argument de la préservation de «l'American Way of Life». Des études scientifiques ont aussi montré que les opinions politiques pouvaient influencer l'inquiétude face au réchauffement climatique.

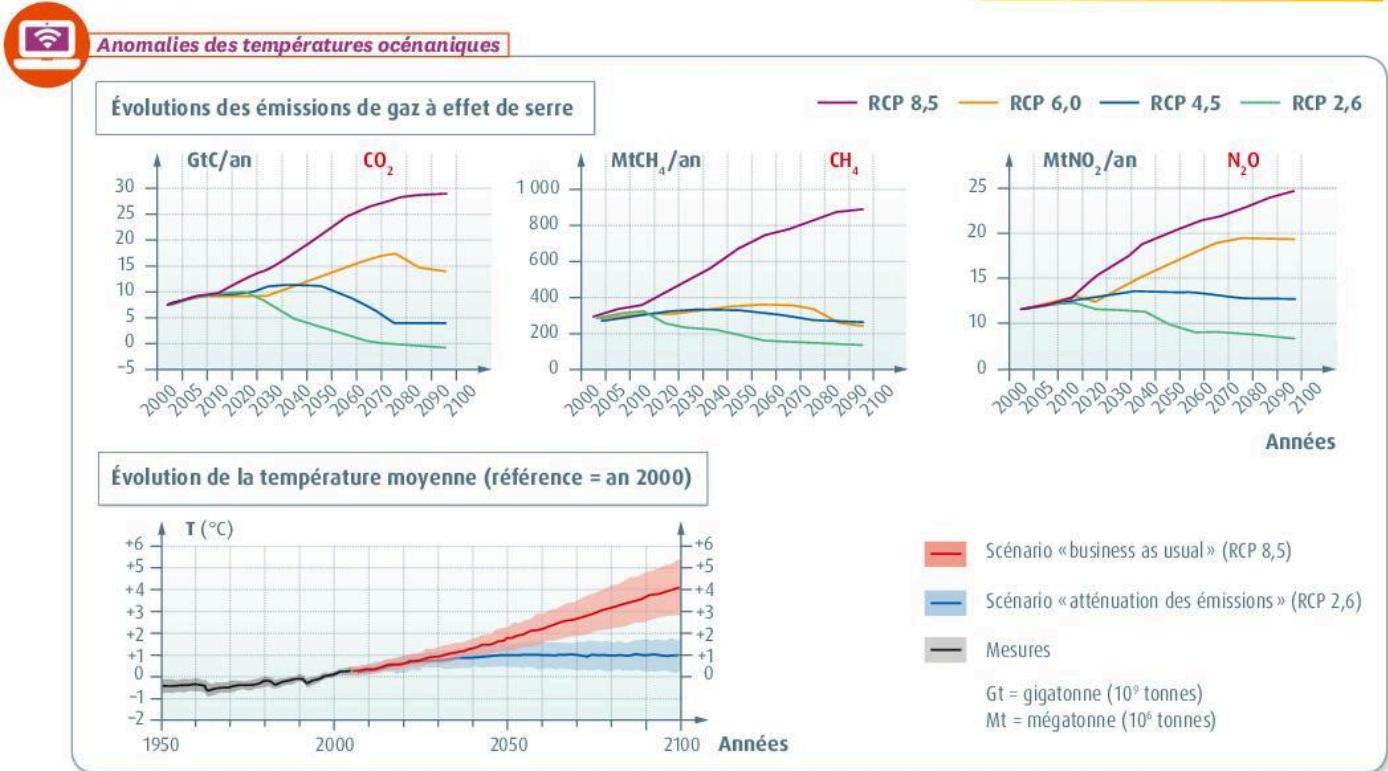
AIDE POUR RÉUSSIR LA MISSION

- Montrez qu'une corrélation seule, hors contexte, n'est pas un argument suffisant pour dire que les humains sont responsables du réchauffement climatique (**DOC. 3**).
- Expliquez comment les scientifiques peuvent passer d'une corrélation à une causalité (**DOCS 3 et 4**).
- Expliquez pourquoi on ne peut pas considérer que le climatoscepticisme est une controverse scientifique (**DOCS 1, 2 et 5**).

Les scénarios d'évolution climatique et leurs conséquences

Les simulations permettent d'envisager les conséquences des différents scénarios d'évolution du climat : entre la poursuite d'un comportement irresponsable et l'arrêt total des rejets.

Quelles sont les conséquences prédictes par les différents scénarios des modélisations climatiques ?



DOC 1 Les scénarios d'évolution de la température moyenne du GIEC. RCP : «Representative Concentration Pathway». Les nombres 2,6/4,5/6,0 et 8,5 correspondent au forçage radiatif de chacun des scénarios, en W·m⁻².



Écosystèmes

- ▶ Modification des effectifs de populations et migrations.
- ▶ Modification dans le déroulement des activités saisonnières.
- ▶ Accroissement à l'échelle globale de l'activité photosynthétique.
- ▶ Brunissement régional de la végétation lié à la sécheresse.
- ▶ Fonte progressive des glaciers continentaux et des glaces de mer.
- ▶ Décongélation du pergélisol.
- ▶ Mort des récifs coralliens : disparition de milliers d'espèces.



Régime des pluies

- ▶ Augmentation de la fréquence des tempêtes d'orage extrêmes.
- ▶ Augmentation de la fréquence des inondations.
- ▶ Accroissement de la fréquence des sécheresses dans certaines régions, diminution dans d'autres.
- ▶ Modification du régime des moussons.



Océans

- ▶ Élévation de la température des eaux de surface de +0,6 à +2 °C et des eaux profondes de +0,3 à +0,6 °C.
- ▶ Élévation du niveau de la mer non uniforme ; plus de 70 % des littoraux qui subiront une élévation du niveau de la mer entre 0,6 et 1 m.
- ▶ Diminution du pH des eaux compris entre 0,05 et 0,25.
- ▶ Modification des courants marins.



Événements climatiques extrêmes

- ▶ Accroissement de la surface des régions concernées par des chaleurs extrêmes (fréquence, intensité, durée des vagues de chaleurs).
- ▶ Accroissement de l'intensité des tornades et des cyclones.

DOC 2 Conséquences d'un réchauffement de +1,5 °C prédictes par le rapport du GIEC de 2019.

Protocole



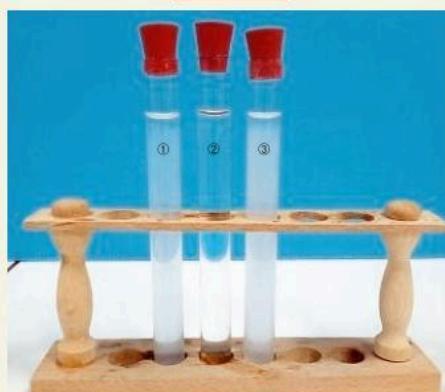
EXPÉRIMENTATION

T = 0

1. Ajouter:

- 10 mL d'eau bouillie dans le tube 1.
- 10 mL d'eau pétillante dans le tube 2.

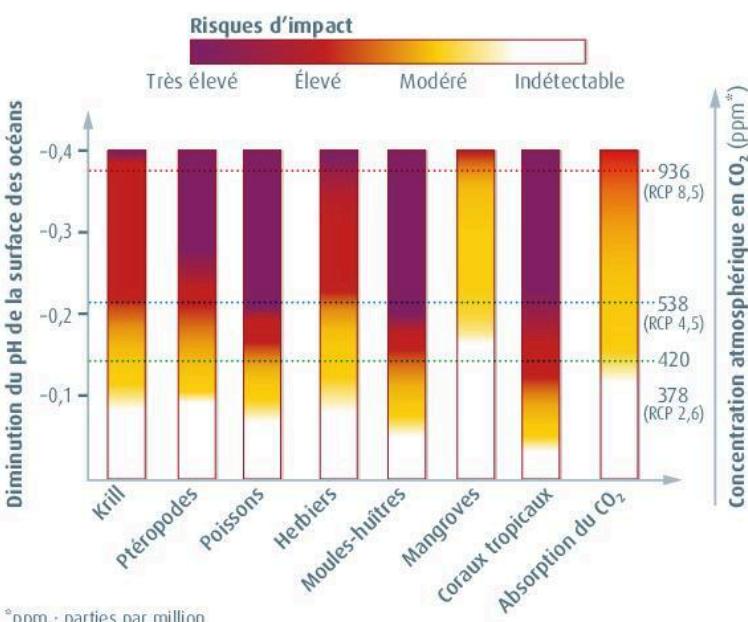
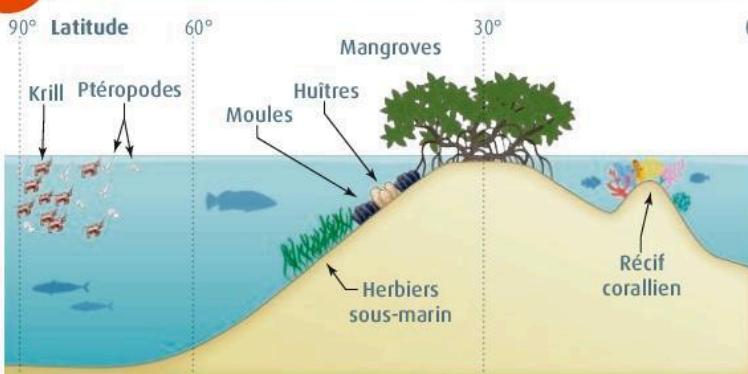
2. Fermer et agiter les tubes.

T = 10 min

DOC 3 Effets de l'acidité sur le calcaire des organismes marins. Le calcaire est un élément-clé pour de nombreux organismes marins : il constitue par exemple le squelette externe des coraux ou la coquille des mollusques. La dissolution du CO₂ dans l'eau (ex. : dans l'eau pétillante) diminue le pH, c'est-à-dire augmente l'acidité de l'eau. Dans l'expérience, le calcaire est présent dans l'eau de chaux.



Modélisation de l'acidification des océans



DOC 4 Effets de l'augmentation de l'acidité sur quelques écosystèmes marins. L'augmentation de l'acidité océanique prévue dans trois scénarios du GIEC est indiquée sur le graphique.

EXPLOITER LES DOCUMENTS
TÂCHE COMPLEXE

À l'aide des documents de la double page, préparez un exposé oral de cinq minutes où vous présenterez les scénarios du GIEC (doc. 1) :

- vous expliquerez comment ces scénarios sont obtenus ;
- vous rappellerez l'origine des gaz à effet de serre cités ;
- vous donnerez des exemples de conséquences sur les écosystèmes et sur les humains des augmentations de température prévues.



ESPRIT CRITIQUE

Le changement climatique risque d'entraîner des déplacements de populations : on parle de « réfugiés climatiques ».

→ Choisissez trois conséquences de la liste du **DOC. 2**. Déterminez dans quelles zones du monde ces conséquences risquent d'entraîner des déplacements de populations.

Pistes de travail ► **DOC. 2 et recherche Internet**

LE CLIMAT DU FUTUR



1. Les modèles numériques du climat

► Dans l'étude du climat, la démarche expérimentale classique ne suffit pas. Les scientifiques font appel à des **modèles globaux du climat**. Le cœur du modèle numérique repose sur des lois physiques, chimiques et biologiques connues. Les climatologues imposent des paramètres d'entrée au modèle qui calcule alors des variables de sortie permettant d'estimer le climat des décennies et des siècles futurs. > [Unité 1](#)

► La surface de la Terre et l'atmosphère des modèles climatiques sont numériquement découpées en mailles. De nombreuses variables météorologiques sont calculées à l'intérieur de chaque maille. La taille d'une maille définit la **Résolution spatiale** du modèle. La durée de temps qui s'écoule entre deux prédictions, appelée pas de temps, définit la **Résolution temporelle**. Les résolutions spatiale et temporelle sont limitées par la puissance de calcul disponible. Cette puissance ne cesse de s'accroître avec le développement de supercalculateurs de plus en plus performants.

> [Unité 2](#)

2. Validité et variabilité des modèles

► Pour tester la validité d'un modèle, les chercheurs confrontent ses variables de sortie à des observations météorologiques actuelles, comme par exemple des données satellitaires. Des simulations de climats passés sont également comparées à des archives paléoclimatiques. > [Unité 2](#)

► À l'intérieur des mailles, les phénomènes physiques complexes comme la formation des nuages sont représentés de manière statistique. Ces approximations incontournables expliquent en grande partie les différences entre les nombreux modèles climatiques. Cette variabilité qu'attaquent les **climatosceptiques** est en réalité au cœur de la construction du savoir scientifique. Les incertitudes sont connues, communiquées et discutées entre les scientifiques. > [Unité 3](#)

3. Responsabilité humaine et conséquences du réchauffement climatique

► En s'appuyant sur des observations, une bonne compréhension des mécanismes en jeu et les résultats des modélisations, les climatologues concluent à la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique. Depuis 150 ans, début de la période industrielle, les gaz à effet de serre, majoritairement le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), sont rejetés en masse par les activités humaines. > [Unité 4](#)

► Différents scénarios publiés dans les rapports du **GIEC** prévoient une augmentation de 1,5 °C à 5 °C de la température moyenne du globe d'ici la fin du xx^e siècle. Cette fourchette dépend de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre humains. D'après les prédictions, ce **réchauffement climatique** aura des conséquences importantes sur les écosystèmes terrestres et marins : le niveau et l'acidité des océans vont augmenter, les régimes des pluies et des événements météorologiques extrêmes vont se modifier. > [Unité 6](#)

► Le réchauffement climatique ayant des enjeux sociétaux et économiques importants, le débat qu'il suscite dépasse largement la sphère scientifique. L'éducation scientifique des populations apparaît comme un enjeu majeur pour déceler le vrai du faux et encourager des comportements responsables. > [Unité 5](#)

Les mots-clés du chapitre

• Modèle global du climat:

Modèle numérique simulant des paramètres climatiques. Combinaison de modèles de l'atmosphère, des océans, des surfaces continentales et des glaces de mer.

• Résolution spatiale:

Taille des mailles du modèle climatique.

• Résolution temporelle:

Durée qui s'écoule entre deux calculs du modèle.

• Climatoscepticisme:

Mouvement remettant en cause le consensus scientifique sur l'origine humaine du réchauffement climatique et sur les conséquences prédictives par les modélisations.

• GIEC:

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Organisme de l'ONU ayant pour but d'évaluer les conséquences du réchauffement climatique d'origine humaine.

• Réchauffement climatique (actuel):

Augmentation de la température moyenne globale observée depuis le début du xx^e siècle.

Ne pas confondre

• Une **diminution** de pH entraîne une **augmentation** d'acidité.

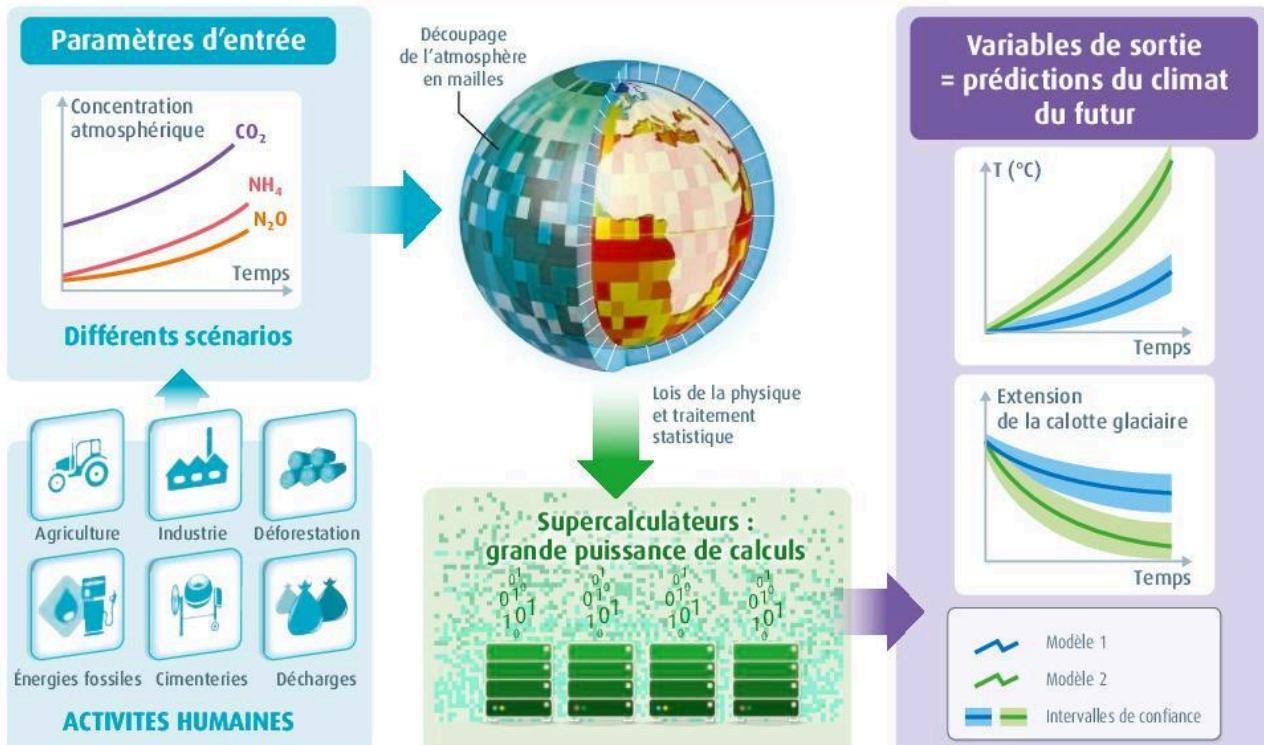
• Corrélation et causalité:

Pour passer d'une corrélation à une causalité, il faut une théorie scientifique explicative des faits observés.

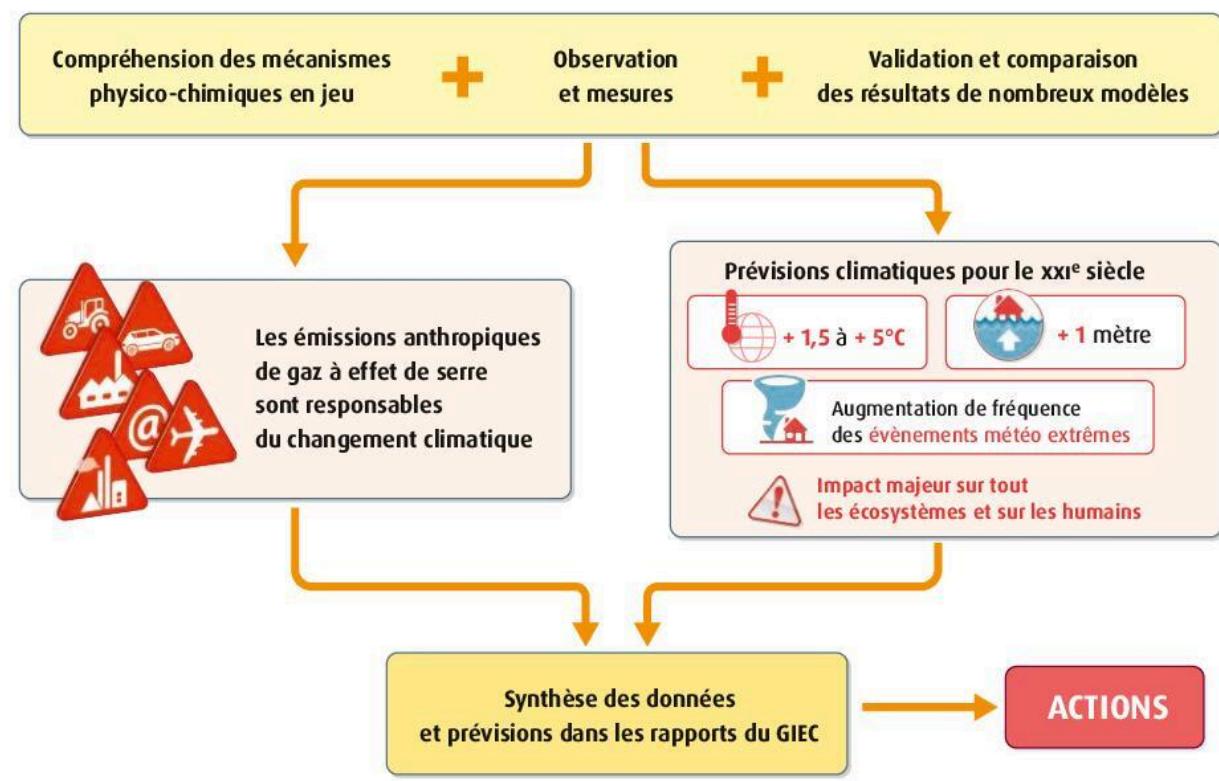
l'essentiel par l'image

Schéma interactif 

Fonctionnement d'un modèle climatique



Origines et conséquences du changement climatique





Mémoriser son cours

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

1. Qu'est-ce qu'un modèle climatique numérique et de quoi est-il composé?
2. Quels sont les intérêts et les limites du maillage dans un modèle climatique?
3. Comment les climatologues évaluent-ils la fiabilité de leurs modèles?
4. Quels sont les trois principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique et quelles sont leur source d'émission principale?
5. La controverse sur le réchauffement climatique est-elle une controverse scientifique ou publique?
6. Quelle conséquence majeure sur les océans est prédictive par les modélisations climatiques?



Pour s'échauffer

1 QCM

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

- 1. Un modèle numérique du climat permet :**
 - a. de renforcer les prévisions météorologiques.
 - b. de prédire l'évolution statistique des grandeurs météorologiques.
 - c. de tester plusieurs scénarios possibles d'activités humaines.
 - d. d'avoir une résolution spatiale de quelques centimètres.
- 2. Un modèle numérique du climat est :**
 - a. constitué de plusieurs sous-modèles couplés.
 - b. ne dépend pas de la puissance de calcul des ordinateurs.
 - c. un programme qu'il faut entièrement réécrire à chaque nouvelle hypothèse testée.
 - d. défini par une résolution temporelle et spatiale.
- 3. Le dioxyde de carbone atmosphérique :**
 - a. n'est pas soluble dans l'eau de mer.
 - b. induit la production de bulles de gaz qui perturbe les coraux.
 - c. se dissout dans l'eau ce qui entraîne une diminution de pH.
 - d. se dissout dans l'eau ce qui entraîne une augmentation de pH.
- 4. Lors du découpage de la surface de la Terre en maille de 10° de longitude et 10° de latitude, on obtient :**
 - a. 360×360 soit 129600 mailles.
 - b. 36×36 soit 1296 mailles.
 - c. 36×18 soit 648 mailles.
 - d. 18×18 soit 324 mailles.
- 5. Le méthane est émis vers l'atmosphère :**
 - a. lors de la fabrication de ciments.
 - b. par la combustion des hydrocarbures par les véhicules à moteurs.
 - c. par la fermentation des déchets.
 - d. par les processus industriels.
- 6. Les phénomènes de taille inférieure à celle de la maille :**
 - a. sont traités aléatoirement dans les mailles.
 - b. sont traités comme des événements statistiques (comme des moyennes par exemple).
 - c. sont des phénomènes physiques complexes.
 - d. nécessitent des approximations.
- 7. Pour évaluer la fiabilité d'un modèle climatique :**
 - a. on compare ses variables de sortie aux données météorologiques actuelles uniquement.
 - b. on le modifie jusqu'à ce que les prédictions collent aux autres modèles de la communauté scientifique.
 - c. on teste son aptitude à modéliser des climats du passé.
 - d. on compare ses variables de sortie aux données météorologiques issues des satellites.
- 8. L'accroissement de la concentration en ion H+ dans l'eau :**
 - a. est la conséquence de l'élévation du pH.
 - b. est la cause de l'élévation du pH.
 - c. est la cause de la diminution du pH.
 - d. est la conséquence de la diminution du pH.
- 9. La production agricole est responsable de la libération vers l'atmosphère de :**
 - a. de CH₄ uniquement.
 - b. CH₄ et de N₂O.
 - c. de N₂O uniquement.
 - d. de CO₂ uniquement.
- 10. Le réchauffement climatique a pour conséquences :**
 - a. la fonte des glaciers.
 - b. la baisse du niveau de la mer.
 - c. une diminution de la photosynthèse à l'échelle globale.
 - d. une diminution de l'intensité des cyclones.

2 Vrai/Faux

1. La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre.
2. Les résultats des modèles ne sont évalués que par comparaison avec des données satellites.
3. La résolution temporelle d'un modèle est définie par la largeur d'une maille.
4. La combustion des ressources carbonées fossiles est la seule source d'émissions de CO₂.
5. Depuis 150 ans, la température moyenne a augmenté de 5°C.
6. Les gaz fluorés sont des gaz à effet de serre qui restent très longtemps dans l'atmosphère.
7. Les modèles climatiques prévoient une élévation du niveau des océans.
8. L'augmentation du pH des océans provoque la dissolution du calcaire de la coquille des mollusques.

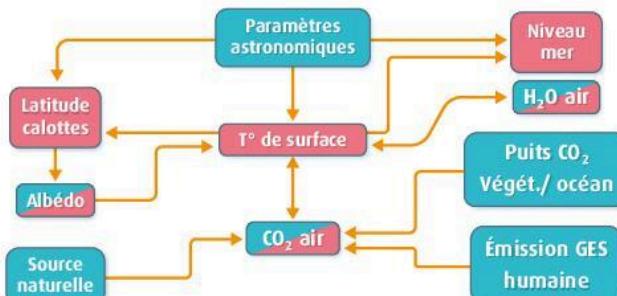
3 Questions à réponses courtes

1. Quel est l'effet des gaz à effet de serre émis par les humains sur le forçage radiatif?
2. Sur quoi repose le cœur des modèles numériques du climat?
3. Qu'est-ce que la résolution temporelle d'un modèle climatique et quel est son ordre de grandeur?
4. Qu'est-ce que la résolution spatiale d'un modèle climatique et quel est son ordre de grandeur?
5. Quelles sont deux conséquences du réchauffement climatique sur les écosystèmes océaniques?
6. Comment s'appelle le groupe d'experts qui évalue les risques liés au réchauffement climatique d'origine anthropique?

4 Retrouvez la question

1. En le confrontant à des observations météorologiques actuelles ou à des paléoclimats.
2. Il repose sur des lois physiques, chimiques et biologiques connues.
3. Le niveau et l'acidité des océans vont augmenter, les régimes des pluies vont se modifier.
4. Depuis 150 ans.
5. Le CO₂, le CH₄, le N₂O.
6. Elles sont limitées par la puissance de calcul disponible.

5 Les variables de Simclimat



1. Pourquoi est-il pertinent de considérer une interaction à double sens entre l'eau atmosphérique et la température de surface?

2. Une augmentation de la latitude des calottes augmente-t-elle l'albédo de la planète ou le diminue-t-elle? Quel sera l'effet prévisible sur la température de surface?
3. Parmi ces paramètres, lesquels sont impliqués dans le forçage radiatif naturel?
4. Quel est le lien entre végétation/océan et quantité de CO₂ atmosphérique?

6 Maillage d'un modèle climatique

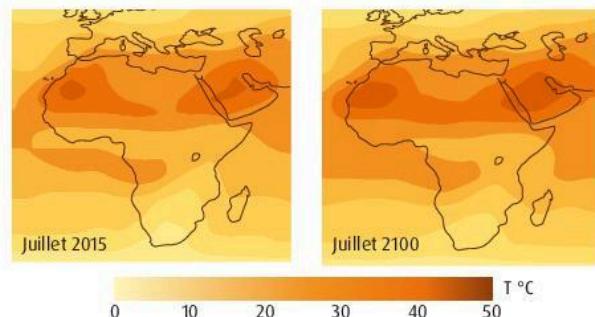
On considère un modèle climatique dans lequel l'atmosphère est découpée en mailles:

60 latitudes × 62 longitudes × 32 niveaux.

1. Évaluez le nombre de mailles à la surface de la Terre. Calculez la taille d'une maille en degrés de longitude et de latitude. Convertissez ce résultat en km au niveau de l'équateur. (Aide p. 62)

7 Une simulation numérique

Ci-dessous, on a figuré une modélisation de la température moyenne terrestre en 2100 par le logiciel Build Your Own Earth.



1. Décrivez les variations de température prédictes pour l'Afrique entre 2015 et 2100.
2. D'après vos connaissances, quelles conséquences pouvez-vous imaginer à ces prédictions?

8 Corrélation et causalité

Le PIB est un indicateur qui mesure les richesses créées par les résidents dans un pays donné, quelle que soit leur nationalité et pour une année donnée. Le PIB mondial correspond à la somme de tous les PIB.

D'après donnees.banquemonde.org



1. En l'absence de données supplémentaires, ces deux graphiques représentent-ils une corrélation ou une causalité?
2. D'après vos connaissances, quelle hypothèse pouvez-vous formuler pour expliquer les évolutions observées?

9 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Des modèles pour anticiper les effets de l'élévation du niveau de la mer

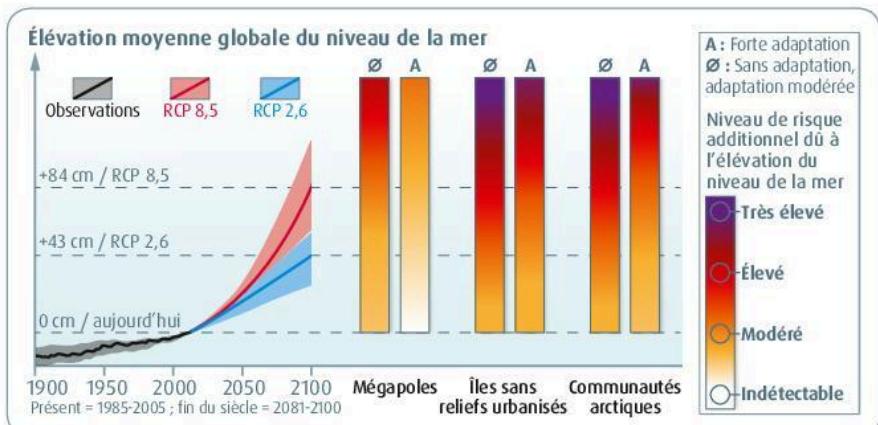
Le rapport du GIEC sur les conséquences de l'élévation du niveau de la mer publié en septembre 2019 a résumé les principaux risques pour les zones côtières les plus menacées. En fonction du scénario envisagé, le GIEC a modélisé les effets dans le cas où le pays concerné ne prend aucune mesure efficace ou au contraire si l'adaptation à ces risques est anticipée et des travaux sont effectués.

Je repère dans le texte les informations qui m'aideront à lire le graphique.

À partir de l'énoncé, je sélectionne les informations du graphique à analyser.

QUESTION

Vous êtes le décideur politique d'une mégapole sur une île urbanisée sans reliefs de l'hémisphère sud. Analysez ce document afin d'en faire la synthèse à vos concitoyens.



DOC 1 Risques pour les zones côtières à la fin du siècle.

D'après le rapport du GIEC, 2019.

RÉSOLUTION

Observations

Zone côtière \ Scénario	Scénario	Adaptation	Scénarios	Élévation moyenne prédictive (cm)	Intensité du risque
Mégapole	RCP 8,5	non	RCP 8,5	84	entre élevé et modéré
		oui	RCP 2,6	43	modéré
	RCP 2,6	non	RCP 8,5	84	entre modéré et indétectable
		oui	RCP 2,6	43	indétectable
Île urbanisée	RCP 8,5	non	RCP 8,5	84	élevé
		oui	RCP 2,6	43	entre élevé et modéré
	RCP 2,6	non	RCP 8,5	84	élevé
		oui	RCP 2,6	43	modéré

Je réalise un tableau à double entrée pour consigner les données observées sur le graphique.

J'interprète les données pour déterminer si les adaptations permettent de diminuer le risque dans les deux scénarios.

Interprétations

Quel que soit le scénario, on observe des risques modérés à élevés lorsqu'aucune adaptation n'est faite. Dans le cas du scénario RCP 2,6, les adaptations permettent de rendre le risque indétectable dans les mégapoles et modéré sur l'ensemble de l'île. Dans le cas du scénario RCP 8,5, le risque est présent y compris si on fait des adaptations : il reste élevé pour l'ensemble de l'île et diminue entre indétectable et modéré pour les mégapoles.

Je tire une conclusion en utilisant mes connaissances sur les scénarios RCP.

Conclusion

Les mégapoles des îles sans relief présentent dès maintenant des risques modérés y compris avec un scénario qui va limiter le forçage climatique par des mesures drastiques de limitation des rejets de CO₂. Les adaptations sont nécessaires dès à présent afin de limiter les conséquences de l'augmentation du niveau de la mer.

Exercices d'application Méthode

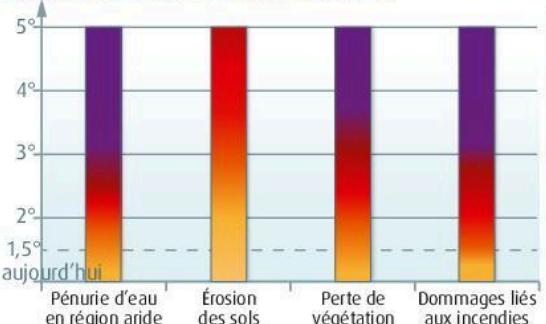
10 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Des modèles pour anticiper les effets sur les agrosystèmes continentaux

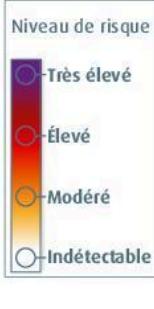
Le rapport du GIEC de septembre 2019 présente les principales conséquences du réchauffement climatique sur les terres cultivées. Le scénario RCP 6,0 modélise une élévation de température comprise entre 2 et 3 °C en 2100.

DOC 1 Risques pour certains écosystèmes continentaux en fonction de la température mondiale de surface.

Élévation de la température globale moyenne par rapport au niveau préindustriel (°C)



D'après le rapport du GIEC, 2019



Prédiction	Pénurie d'eau en région aride	Érosion des sols	Perte de végétation	Dommages liés aux incendies
Impact sur ...				
les moyens de subsistance	oui	oui	oui	non
la valeur du terrain	oui	oui	non	oui
la santé humaine	oui	oui	oui	oui
la santé des écosystèmes	oui	non	oui	oui
les infrastructures	oui	non	non	oui

QUESTION

Discutez de l'intensité des risques liés à un réchauffement qui évoluerait selon le scénario RCP 6,0, et des conséquences sur la santé humaine.

DOC 2 Impacts de ces risques sur certains systèmes.

AIDE

1. J'ai localisé sur le **DOC. 1** l'intensité des risques liée au scénario RCP 6,0.
2. J'ai sélectionné dans le **DOC. 2** les impacts concernant la santé humaine.
3. Je croise les données pour répondre au problème.

11 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

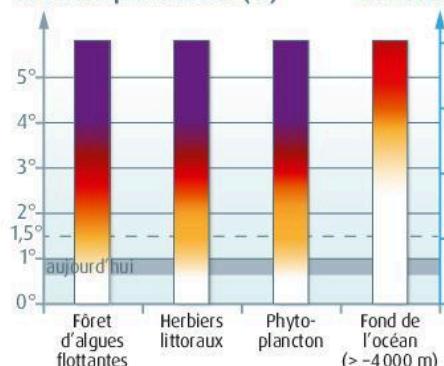
Impact du réchauffement climatique sur des organismes marins

Les algues, les herbes et le phytoplancton piégent de gigantesques quantités de CO₂ dissous dans les océans pour fabriquer leur matière organique. Celle-ci est ensuite en grande partie piégée sous forme de sédiments à l'origine de futurs combustibles fossiles. Les modélisations ont évalué les risques du réchauffement climatique sur la croissance de ces organismes, qu'on compare aux écosystèmes des fonds océaniques profonds où la lumière ne pénètre pas.

QUESTION

Discutez des conséquences d'un réchauffement global de 3 °C sur le piégeage du CO₂ par la photosynthèse océanique.

Élévation de la température globale moyenne par rapport au niveau préindustriel (°C)



Élévation de la température de la surface des eaux par rapport au niveau Préindustriel (°C)



D'après le rapport du GIEC, 2019

DOC 1 Risque pour différents écosystèmes marins liés à un réchauffement climatique.

Tester ses compétences

12 Effectuer et contrôler des calculs

Puissance de calcul

Si les codes des modèles climatiques deviennent de plus en plus complexes et les résolutions spatiale et temporelle des modèles augmentent, c'est, entre autres, grâce à l'amélioration des performances des supercalculateurs.

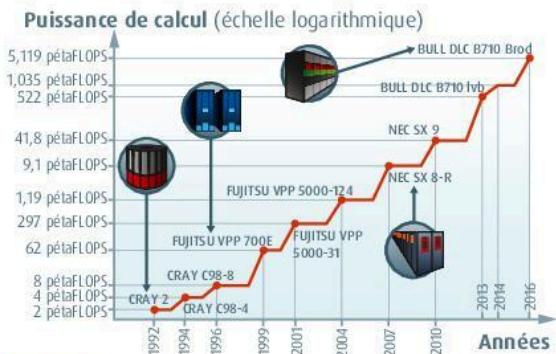
La vitesse de calcul d'un calculateur scientifique se mesure en FLOPS : « floating-point operations per second », que l'on traduit par « opérations à virgule flottante par seconde » en français.

1 gigaFLOPS = 10^9 opérations par seconde	1 téraFLOPS = 10^{12} opérations par seconde	1 pétaFLOPS = 10^{15} opérations par seconde
--	---	---

BYOE est une application pédagogique qui présente les résultats pré-enregistrés d'un modèle climatique : FOAM. Dans ce modèle, chaque colonne d'air comporte un empilement de 18 mailles atmosphériques mesurant $7,5^\circ$ de longitude par $4,5^\circ$ de latitude. Le pas de temps est de 20 minutes. Pour simuler 480 ans de climat, le programme doit tourner pendant 24 h.

QUESTIONS

- Convertissez la vitesse de calcul du Bull DLC B710 Brod en gigaflops (**DOC. 1**).
- Indiquez le facteur de multiplication de la vitesse de calcul sur la période donnée, ainsi que la moyenne d'évolution de ce facteur par an (**DOC. 1**).
- Évaluez le nombre et la taille des mailles dans BYOE (**DOC. 2**).
- En supposant que le programme doive calculer 20 variables différentes à chaque pas de temps pour



DOC 1 Évolution de la puissance de calcul théorique de Météo-France depuis 1992.

DOC 2 Maillage dans « Build your Own Earth » (BYOE).

• AIDE, p. 62

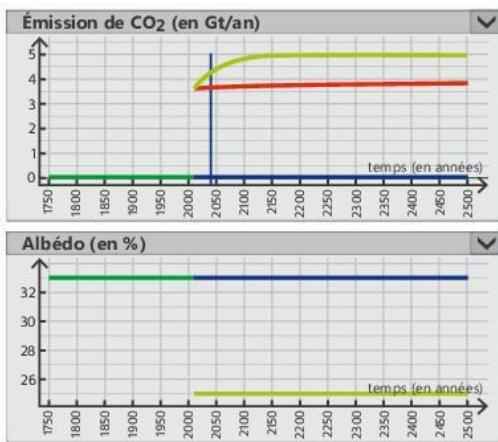
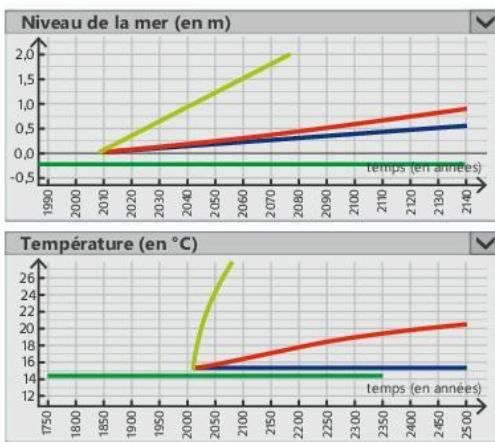
le système atmosphérique, déduisez-en le nombre d'opérations par seconde pour simuler 480 ans (**DOC. 2**).

- Imaginons que le programme puisse simuler 480 ans en une minute. Calculez le nombre d'opérations par seconde que cela représente alors. D'après le **DOC. 1**, nommez le premier supercalculateur qui aurait pu permettre de faire ce calcul. (1 Flop = 1 opération par seconde)

13 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Exploitation de Simclimat

Les écrans suivants ont été obtenus sur Simclimat à partir de 4 scénarios : le monde en 1750, le monde en 2007, le monde en 2007 avec émissions de CO₂ stoppées, le monde en 2007 avec albédo de 25%.



AIDE

- J'observe d'abord les courbes des paramètres d'entrée (albédo et émissions de CO₂).

QUESTION

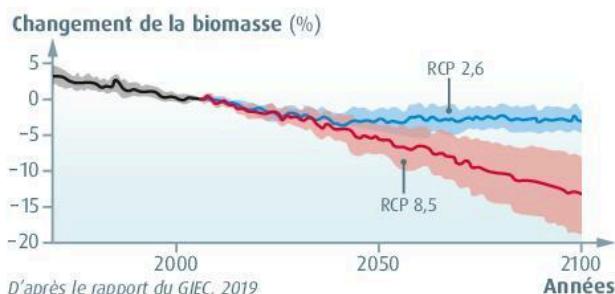
Pour chaque écran, associez chaque courbe à l'un des scénarios en argumentant chacun de vos choix.

14 Exploiter des documents

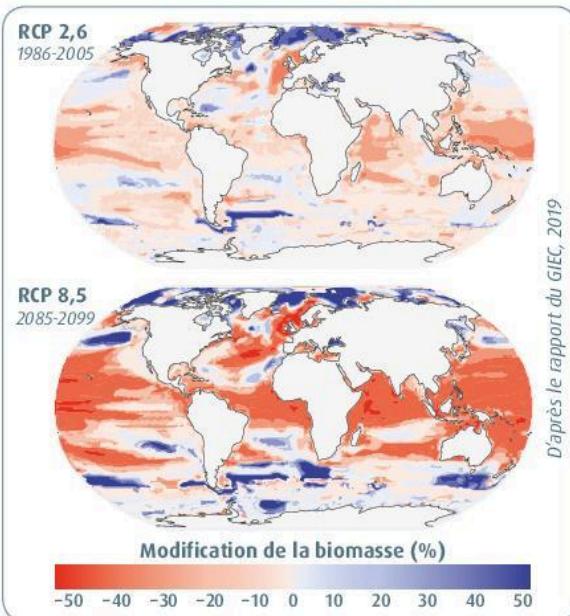
Biomasse et climat

Les ressources halieutiques marines (ressources vivantes animales et végétales) fournissent chaque année environ 85 millions de tonnes de protéines pour l'alimentation humaine et animale.

La pérennité de ces ressources est directement liée à la «bonne santé» de l'écosystème, qu'on détermine notamment par l'estimation de la biomasse animale totale (vertébrés et invertébrés). L'évolution de la biomasse marine pour les scénarios RCP 2,6 et 8,5 est modélisée ci-dessous (moyenne de 10 modèles).



DOC 1 Évolution de la biomasse marine de 1986 à 2100.



D'après le rapport du GIEC, 2019

DOC 2 Carte de l'évolution spatiale de la biomasse entre 1986-2005 et 2085-2099 selon les scénarios RCP 2,6 et 8,5.

QUESTIONS

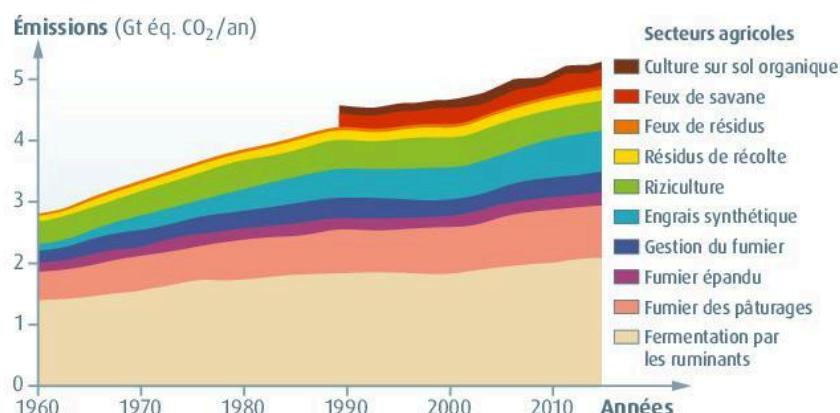
- Calculez pour chaque scénario la vitesse d'évolution de la biomasse entre 2000 et 2050 puis pendant les 50 années suivantes (**DOC. 1**).
- Localisez pour chaque scénario les zones qui montrent une évolution positive de la biomasse, celles qui ont une évolution négative et celles qui ne semblent pas touchées (**DOC. 2**).
- Tirez une conclusion sur l'évolution de l'utilisation à court ou long terme des ressources halieutiques en France et dans différentes régions et collectivités d'outre-mer.

15 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

Agriculture et effet de serre

Le rapport du GIEC «Changement climatique et terre» d'août 2019 souligne l'évolution des émissions de gaz à effet de serre de certains secteurs et pratiques agricoles de 1960 à 2015.

DOC 1 Évolution des émissions de CO₂ liées au secteur agricole entre 1960 et 2015 (en Gigatonnes équivalent CO₂ par an).

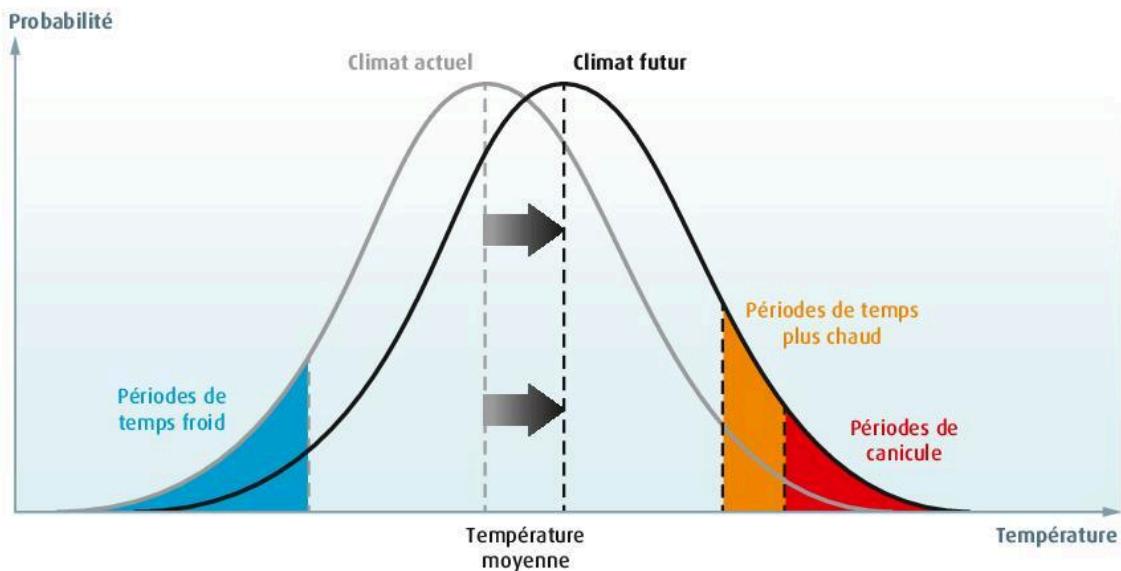


QUESTIONS

- Calculez le pourcentage de la contribution de chaque secteur à la production de gaz à effet de serre par les pratiques agricoles en 1960 puis en 2015. Vous présenterez vos résultats sous forme de tableau.
- En comparant les pourcentages obtenus, déterminez quelles pratiques ou secteurs agricoles ont contribué à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre depuis 1960.

16 Exploiter des documents**L'évolution future des événements météorologiques extrêmes**

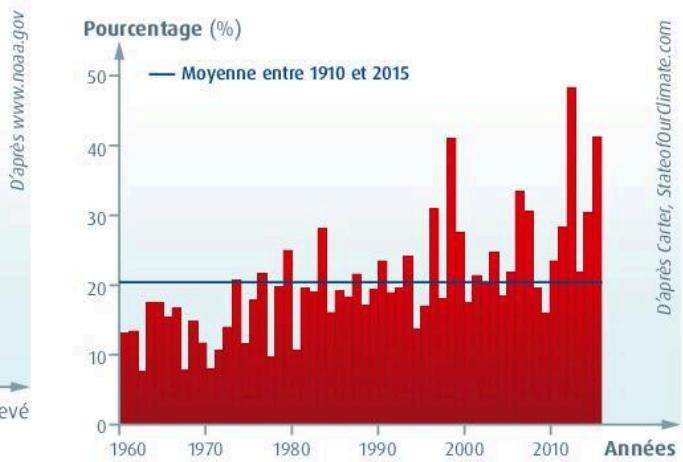
Une question majeure liée au changement climatique actuel est de savoir comment seront modifiés les événements extrêmes, à la fois dans leur intensité et leur fréquence. Les projections fournies par les modèles de climat apportent des éléments de réponse.



DOC 1 Effet du réchauffement climatique sur les événements météorologiques extrêmes.



DOC 2 Confiance relative dans la prédiction de différents événements météorologiques extrêmes.



DOC 3 Événements météorologiques extrêmes aux États-Unis entre 1960 et 2015.

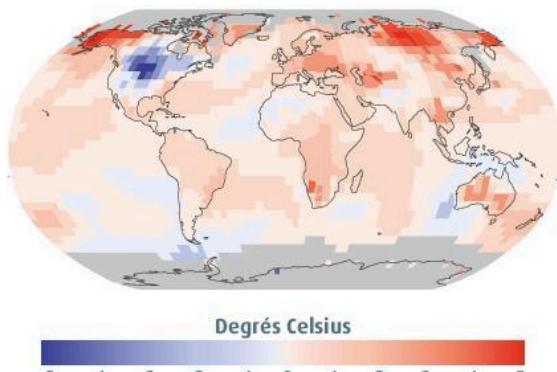
QUESTIONS

1. Décrivez comment le réchauffement climatique va modifier les probabilités de temps chaud, de canicule et de temps froid (**DOC. 1**).
2. Indiquez la confiance que les climatologues placent dans ces prédictions (**DOC. 2**).
3. Les périodes de canicules étant considérées comme des événements météorologiques extrêmes, expliquez si les données actuelles vont dans le sens de ces prédictions (**DOC. 3**). Indiquez si des données supplémentaires vous semblent nécessaires pour conclure.

17 Exploiter des documents, rédiger une argumentation scientifique

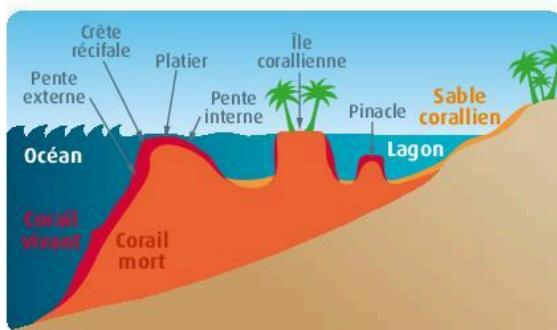
Quel futur pour les écosystèmes récifaux ?

Depuis quelques dizaines d'années les récifs coralliens montrent des symptômes de stress et de mauvaise santé. Les scientifiques s'interrogent pour savoir si ce phénomène est dû aux rejets de gaz à effet de serre anthropiques.



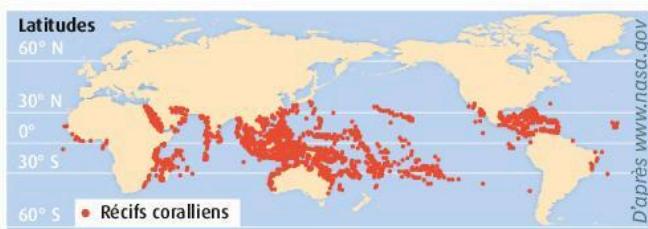
D'après www.noaa.gov

DOC 2 Anomalies des températures moyennes de janvier à juillet 2019 définies par rapport à la période 1981-2010.



DOC 3 Structure d'un récif et localisation des constructions récifales.

La structure récifale protège les côtes des vagues et des tempêtes. Elle offre des sources de nourriture et d'attraction touristique autour desquelles tourne l'économie régionale.



DOC 1 Répartition latitudinale mondiale des récifs coralliens. Les écosystèmes récifaux se développent en eau peu profonde et bien oxygénée sur les littoraux des régions où la température des eaux varie peu au cours de l'année. Les variations de température constituent un stress important pour les différentes espèces de coraux.



Des études récentes faites dans le Pacifique et l'océan Indien portent sur le comptage et la détermination des espèces de coraux. Les scientifiques considèrent que si une espèce se développe au-delà d'un taux de couverture du fond marin de 10 %, elle n'est pas stressée. *Platygyra* est une forme de corail «en coussin», plus petite et plus simple qu'*Echinopora*, avec une croissance lente. L'augmentation de *Platygyra* au sein d'un récif modifie la forme et la résistance de celui-ci. Un tel récif en bordure de littoral offrira une protection moindre face à la montée des eaux par exemple.

DOC 4 Stress et résilience des coraux.

QUESTIONS

- À l'aide de vos connaissances, expliquez dans un paragraphe de 5 lignes maximum comment les gaz à effet de serre rejetés par les humains peuvent être responsables d'une augmentation globale de la température terrestre.
- En mettant en relation les données des **docs 1 et 3**, déterminez dans quelles zones du globe le stress pour les coraux risque d'être le plus important.
- On entend souvent dire que le réchauffement climatique détruit tous les coraux. Nuancez cette affirmation à l'aide du **DOC. 4**.
- À l'aide des **docs 3 et 4**, énoncez des conséquences écologiques et économiques du stress des coraux pour les habitants des îles coraliennes.