

$$R_{\text{renvoyé}} = f(R_{\text{soleil}}, A_{\text{surface}}, \dots)$$

LE CLIMAT ENTRE NOS MAINS

MODÈLES CLIMATIQUES

Manuel à destination des enseignants
du lycée



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Office for
Climate
Education

UNDER THE AUSPICES OF UNESCO
AND THE FOUNDATION LA MAIN À LA PÂTE



LE CLIMAT ENTRE NOS MAINS

Modèles climatiques

Manuel à destination des enseignants de lycée

Ce document doit être référencé comme suit : « **Le climat entre nos mains – Modèles climatiques, manuel à destination des enseignants de lycée, Office for Climate Education (OCE), Paris, 2024** ».

Coordinateur

Nicolas Vogt (OCE, France)

Auteur-riche-s

Adeline Aroskay (OCE, France)

Mathieu Hirtzig

Simon Klein (OCE, France)

Jessica Vial (OCE, France)

Nicolas Vogt (OCE, France)

Correcteur-riche-s et inspiration

Anwar Bhai Rumjaun (Mauritius Institute of Education, Île Maurice)

Nada Caud (Groupe de travail 1 du GIEC, Unité de support technique)

Natalie Chong (OCE)

Cruz Garcia (Institut des Géosciences de l'Environnement, CNRS, France)

Hazel Jeffery (National Centre for Atmospheric Science, Royaume-Uni)

Colin Jones (MET Office, Royaume-Uni)

Valentin Maron (INSPE Toulouse, laboratoire EFTS, France)

Cliona Murphy (Institute of Education, Dublin City University, Irlande)

Natalie Nicetto (OCE)

Eva Perrier-Ponsin (OCE)

Micol Picasso (OCE)

Mariana Rocha (Météo-France, CNRM, France)

Djian Sadadou (OCE)

Roland Sférian (Météo-France, CNRM, France)

Jenny Schlüpmann (Freie Universität Berlin, Allemagne)

Sally Soria-Dengg (Max Planck Institute, Allemagne)

Robin Waldman (Météo-France, CNRM, France)

David Wilgenbus (OCE)

Mise en page et graphisme : Mareva Sacoun

Traduction française : Joanna Tabet

Mise en page version française : Amandine Masson et Virginie Poilievre

Une liste complète des nombreuses personnes qui ont contribué à cet ouvrage, par leurs critiques, leurs propositions ou leurs tests en classe est fournie dans la section [Remerciements, page 83](#).

Tests en classe

Un grand merci aux enseignants et aux élèves qui ont testé les activités et nous ont fait part de leurs commentaires ! Leur travail a fait participer au projet plus de 100 jeunes à travers l'Europe. Nous espérons qu'ils seront encore plus nombreux à l'avenir !

Date de publication

Janvier 2025

Informations

Les versions anglaise et espagnole sont aussi disponibles. Des informations sur le travail de l'Office for Climate Education, ainsi que des exemplaires supplémentaires de ce document, peuvent être obtenus à l'adresse suivante :

Office for Climate Education

Sorbonne-Université

4 Place Jussieu, 75005 Paris – France

E-mail : contact@oce.global

Site internet : <https://oce.global>

Copyright

Cet ouvrage a été publié par l'Office for Climate Education sous licence Creative Commons : il peut être partagé gratuitement et adapté sans utilisation commerciale.



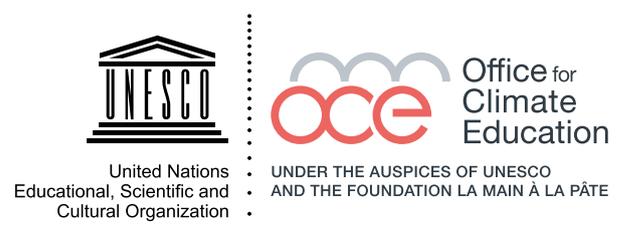
DES MODÈLES DU SYSTÈME TERRE POUR L'AVENIR

ESM2025 est un projet européen ambitieux coordonné par Météo-France - Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Avec une équipe internationale composée de 19 instituts de recherche européens et d'une université australienne, ESM2025 renforce la collaboration internationale en matière de modélisation du système terrestre en réunissant cinq modèles européens au sein d'un même projet : les modèles du CNRM, de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), de l'Institut Max Planck de météorologie (MPI-M), et ceux de la Norvège (NorESM) et du Royaume-Uni (UKESM).

Le projet vise à développer la prochaine génération de modèles du système terrestre (ESM pour *Earth System Model*) qui fourniront de meilleures simulations climatiques, contribuant ainsi à l'élaboration de stratégies d'atténuation et d'adaptation ambitieuses et réalistes.

Grâce à ces projections climatiques améliorées, ESM2025 vient soutenir les services climatiques européens et les évaluations du GIEC. En s'appuyant sur les connaissances de parties prenantes clés, le projet ESM2025 vise à fournir des connaissances scientifiques pertinentes et des orientations pour l'élaboration de politiques solides, soutenant les transformations sociétales nécessaires à la construction d'une société future décarbonée et résiliente aux changements environnementaux.

ESM2025 s'adresse également à la jeune génération en développant du matériel éducatif et pédagogique à destination des jeunes citoyens européens. L'objectif est d'accroître la compréhension du public sur les changements climatiques et les enjeux qui y sont liés, tout en renforçant l'engagement en faveur des transformations sociétales nécessaires à la mise en œuvre de l'Accord de Paris.



L'OFFICE FOR CLIMATE EDUCATION

Créé en 2018 à l'initiative de la Fondation *La main à la pâte* et de la communauté scientifique, l'Office for Climate Education (OCE) a pour but de mettre en place une forte coopération internationale entre organismes scientifiques, ONG et institutions éducatives pour éduquer les générations actuelles et futures aux changements climatiques.

L'OCE et ses partenaires ont pour mission de promouvoir l'éducation aux changements climatiques dans le monde entier par des ressources pédagogiques de qualité, une offre de développement professionnel, ainsi que la conception et la mise en œuvre de projets opérationnels nationaux voire internationaux.

En 2020, l'Office for Climate Education est devenu un centre de catégorie 2 sous l'égide de l'UNESCO. Cette institutionnalisation vise à promouvoir l'éducation aux changements climatiques au niveau international, en ciblant particulièrement les pays émergents.

Dans le cadre du projet ESM2025, l'OCE développe des ressources gratuites, multilingues, sous licence libre et testées en classe : animations multimédias, manuels pour enseignants, jeux sérieux et protocoles de formation à destination des formateurs d'enseignants. L'OCE organise également, en partenariat avec Météo-France, des formations pour les enseignants et formateurs à travers l'Europe (Universités d'été sur l'éducation aux changements climatiques) ainsi que des Climathons.

SOMMAIRE

5	INTRODUCTION	
	Présentation du manuel	5
	Approche pédagogique	8
	Comment enseigner au climat?	9
10	SÉQUENCE A - LE SYSTÈME CLIMATIQUE DE LA TERRE	
	Séance 1 – Les composantes du système climatique	10
	Séance 2 – Les lois de la physique	20
	Séance 3 – Modéliser le climat à l’aide d’un jeu de plateau	30
44	SÉQUENCE B - MODÉLISATION DU CLIMAT	
	Séance 4 – Des modèles pour représenter la réalité	44
	Séance 5 – Les modèles climatiques évoluent	48
	Séance 6 – Validation des modèles numériques	52
63	SÉQUENCE C - DES MODÈLES CLIMATIQUES POUR PRÉDIRE L’AVENIR	
	Séance 7 – Élaborer des scénarios et observer les réponses des modèles	63
	Séance 8 – Les îlots de chaleur urbains (ICU)	70
	Séance 9 – Littérature des futurs	77
81	GLOSSAIRE	
83	REMERCIEMENTS	
84	CRÉDITS	

INTRODUCTION

Présentation du manuel

OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES DES DIFFÉRENTES ACTIVITÉS PROPOSÉES

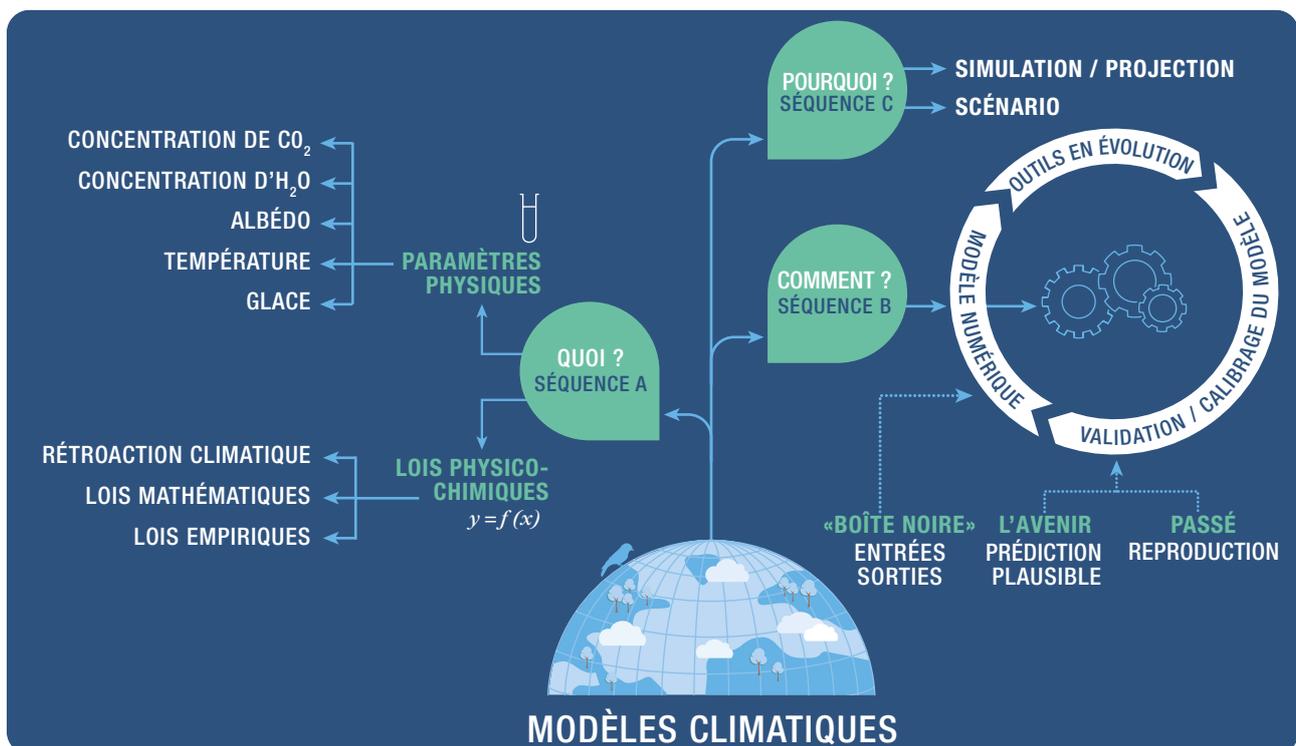
À l'issue de ces activités, les élèves seront capables de:

- Énumérer des paramètres étudiés par les climatologues et identifier des preuves des changements climatiques.
- Démontrer que la tendance actuelle de réchauffement de la planète est causée par les activités humaines et entraîne de nombreuses perturbations climatiques.
- Comprendre la complexité du système climatique de la Terre.
- Comprendre que les modèles climatiques sont des outils fiables, pertinents et en constante évolution.
- Expliquer le lien entre les émissions de gaz à effet de serre, les concentrations de ces gaz dans l'atmosphère et les changements climatiques mondiaux en utilisant un modèle numérique simple.
- Comprendre les projections du GIEC.
- Faire la différence entre l'adaptation et l'atténuation, ainsi qu'entre les synergies et les compromis avec les Objectifs de Développement Durable (ODD).



Vue satellite de la Terre avec sa couche nuageuse, l'un des éléments fondamentaux du système climatique de la Terre.

LES CONCEPTS DÉVELOPPÉS DANS CE MANUEL



QUOI ?

SÉQUENCE A LE SYSTÈME CLIMATIQUE DE LA TERRE

1

Les composantes du système climatique

Les élèves passent en revue les preuves de l'existence du changement climatique, puis dressent la liste de tous les paramètres physiques à prendre en compte pour l'étudier.

2

Les lois de la physique

Les élèves réalisent des expériences portant sur certains de ces paramètres afin de comprendre que chacun d'entre eux dépend (ou « est fonction ») de plusieurs autres. Cette interdépendance peut être décrite de manière approfondie.

3

Modéliser le climat à l'aide d'un jeu de plateau

Les élèves déterminent les paramètres qui permettent de décrire le climat dans un environnement donné. Ils voient comment les valeurs de ces paramètres changent avec le changement climatique. Ils découvrent ensuite que les différents environnements peuvent interagir les uns avec les autres.

COM-
MENT ?

SÉQUENCE B LA MODÉLISATION DU CLIMAT

4

Des modèles pour représenter la réalité

Les élèves découvrent les concepts de données d'entrée, d'échantillonnage et de données de sortie. Ils travaillent sur un code Python, qu'ils modifient, pour attester que le changement des données d'entrée modifie les données de sortie.

5

Les modèles climatiques évoluent

Ils comprennent l'analogie entre l'évolution d'un jeu vidéo et l'évolution d'un modèle.

6

Validation des modèles numériques

Les élèves apprennent à évaluer la fiabilité des modèles numériques : reproduction d'événements passés ou prédiction d'événements futurs vraisemblables.

POUR-
QUOI ?

SÉQUENCE C DES MODÈLES CLIMATIQUES POUR PRÉDIRE L'AVENIR

7

Élaborer des scénarios et observer les réponses des modèles

Le modèle de production laitière : les élèves font des choix pour élaborer et étudier des choix (scénario) et observent la production laitière obtenue (projection).

8

Les îlots de chaleur urbains (ICU)

À l'aide d'une animation multimédia, les élèves font la différence entre les scénarios d'atténuation et d'adaptation. Ils observent les synergies et les compromis qui existent avec les Objectifs de Développement Durable.

9

Littérature des futurs

En choisissant l'un des scénarios étudiés dans la leçon précédente et en l'appliquant à leur propre ville, les élèves imaginent des futurs à la fois désirables et dans un monde changeant.



TABLEAU DES COMPÉTENCES UTILISÉES DANS CE MANUEL (BASÉ SUR LE GREENCOMP¹)

DOMAINE 1 INCARNER LES VALEURS DE LA DURABILITÉ

GREENCOMP	DESCRIPTION	SÉANCE
1.1 Accorder de la valeur à la durabilité	Réfléchir aux valeurs personnelles; déterminer et expliquer comment les valeurs varient selon les individus et dans le temps, tout en évaluant de façon critique comment elles se concilient avec les valeurs de la durabilité. <i>Ex</i> : prévoir l'impact d'une escapade en avion pour le week-end.	7
1.2 Encourager l'équité	Favoriser l'équité et la justice pour les générations actuelles et à venir, et mettre ce que l'on apprend des générations précédentes au service de la durabilité. <i>Ex</i> : les initiatives de lutte contre la déforestation.	9
1.3 Promouvoir la nature	Reconnaître que les êtres humains font partie de la nature; respecter les besoins et les droits des autres espèces et de la nature elle-même afin de rétablir des écosystèmes sains et résilients et de les régénérer. <i>Ex</i> : l'utilisation de ressources éducatives pour comprendre le fonctionnement de la nature.	1 - 7

DOMAINE 2 S'OUVRIRE À LA COMPLEXITÉ DANS LA DURABILITÉ

GREENCOMP	DESCRIPTION	SÉANCE
2.1 Pensée systémique	Aborder un problème de durabilité sous tous les angles; prendre en considération le temps, l'espace et le contexte afin de comprendre comment les éléments interagissent au sein des systèmes et entre ceux-ci. <i>Ex</i> : production de biocarburants et concurrence accrue pour les terres.	1 - 3 - 6
2.2 Pensée critique	Évaluer les informations et les arguments, recenser les idées préconçues, remettre en cause l'inertie, et réfléchir à la manière dont les origines personnelles, sociales et culturelles influencent la pensée et les conclusions. <i>Ex</i> : compréhension critique des problèmes liés à la vente massive de voitures électriques.	3 - 6
2.3 Cadrage des problèmes	Exposer les défis actuels ou potentiels comme étant un problème de durabilité en termes de difficulté, de personnes concernées, de portée temporelle et géographique, afin de définir des approches adaptées pour prévoir et prévenir les problèmes, et pour atténuer les problèmes existants et s'y adapter. <i>Ex</i> : activité de cartographie des controverses.	2 - 5

DOMAINE 3 ENVISAGER DES AVENIRS DURABLES

GREENCOMP	DESCRIPTION	SÉANCE
3.1 Littératie des futurs	Envisager des futurs durables alternatifs en imaginant et en élaborant des scénarios alternatifs et en déterminant les étapes nécessaires pour parvenir à un avenir durable jugé meilleur. <i>Ex</i> : atelier d'écriture.	9
3.2 Adaptabilité	Gérer les transitions et les défis dans des situations complexes sur le plan de la durabilité et prendre des décisions liées à l'avenir malgré l'incertitude, l'ambiguïté et le risque. <i>Ex</i> : végétaliser les cours d'école.	8 - 6
3.3 Pensée exploratoire	Adopter un mode de pensée relationnel en explorant et en mettant en relation différentes disciplines, en utilisant la créativité et l'expérimentation avec des idées ou des méthodes inédites. <i>Ex</i> : imaginer des modèles de consommation circulaire à l'échelle d'une école.	4 - 9

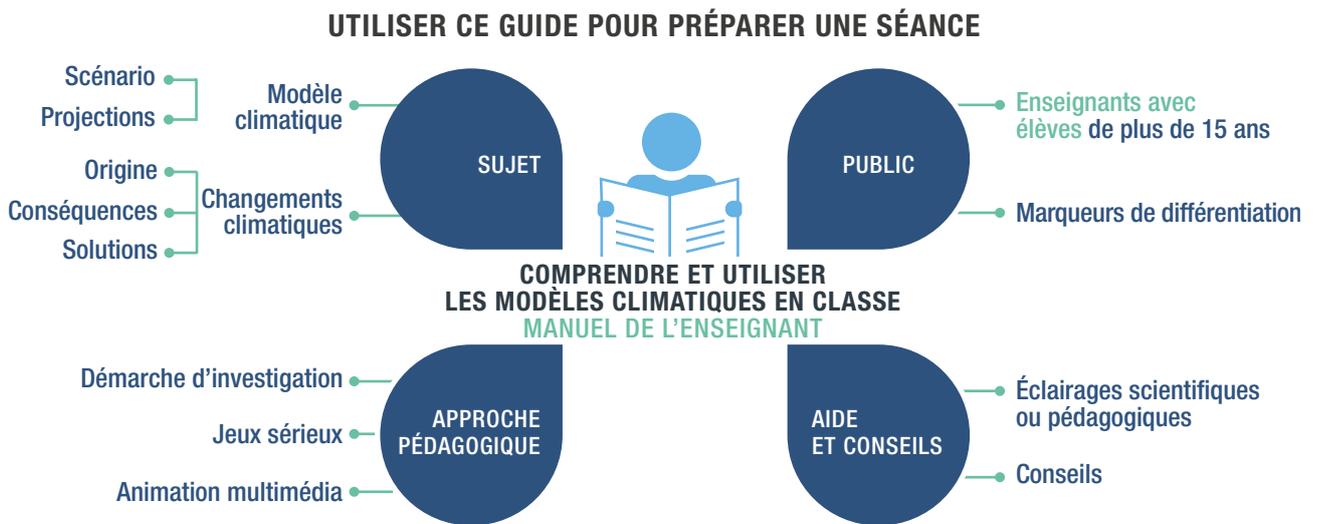
DOMAINE 4 AGIR POUR LA DURABILITÉ

GREENCOMP	DESCRIPTION	SÉANCE
4.1 Agentivité politique	S'orienter dans le système politique, déterminer qui est responsable sur le plan politique et a l'obligation de rendre des comptes pour les comportements non durables, et exiger des politiques efficaces au service de la durabilité. <i>Ex</i> : s'engager en tant qu'éco-délégué.	8
4.2 Action collective	Agir pour le changement en collaboration avec d'autres. <i>Ex</i> : Participer à un projet de sciences participatives, comme le projet « Qui protège les chênes ? » ² .	8 - 9
4.3 Initiative individuelle	Déterminer son propre potentiel d'action pour la durabilité et contribuer activement à améliorer les perspectives pour la localité et pour la planète. <i>Ex</i> : augmenter la proportion de déplacements à vélo.	8 - 9

1 2022, Commission européenne, Centre commun de recherche. Le GreenComp, cadre européen de compétences en terme de durabilité. Disponible sur le site internet de publications de l'Union européenne (<https://op.europa.eu/fr/publication-detail/-/publication/bc83061d-74ec-11ec-9136-01aa75ed71a1/language-fr>)

2 <https://sites.google.com/view/oakbodyguards/home/français?pli=1>

Approche pédagogique



L'ORGANISATION DES ACTIVITÉS

La **DURÉE** comprend le temps de préparation (pour vous) et le temps de l'activité (avec vos élèves)

La **TRANCHE D'ÂGE** est donnée à titre indicatif

MÉTHODE(S) PÉDAGOGIQUE(S) de cette activité

Principale compétence en matière de durabilité que vos élèves travailleront (**GREENCOMP**)

APERÇU DES DISCIPLINES CONCERNÉES

LES PRINCIPAUX OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

CONNAISSANCES ET COMPÉTENCES QUE VOS ÉLÈVES ACQUIERONT AU COURS DE CETTE SÉANCE

L'ENCADRÉ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

VOUS DONNE DES ASTUCES CONCERNANT LA MÉTHODOLOGIE OU L'ACTIVITÉ MISE EN ŒUVRE.

Liste des **CONCEPTS** liés à l'activité (définis dans le glossaire à la page 81)

Certaines séances comportent un encadré intitulé « **ÉCLAIRAGES SCIENTIFIQUES OU PÉDAGOGIQUES** » à destination de l'enseignant, pour approfondir ou anticiper les questions des élèves.

NIVEAUX

Ces activités s'adressent aux élèves de plus de 15 ans (au lycée, donc). Chacune a été testée dans une classe précisément de cet âge. Bien entendu, cela ne signifie pas que les activités en question ne peuvent pas être proposées à une autre tranche d'âge: il s'agit simplement de vous donner une **idée du niveau d'aptitude requis et du niveau de maîtrise des compétences ciblées**.

NIVEAU DE DIFFICULTÉ DU DOCUMENT

La plupart des séances comprennent plusieurs documents avec différents niveaux de difficulté. Certains sont faciles à comprendre, tandis que d'autres sont destinés à des élèves plus avancés. Gardez à l'esprit **qu'il ne s'agit que d'une recommandation**: vous seul-e s êtes en mesure de déterminer lesquels sont adaptés au niveau de vos élèves. Les différents niveaux sont les suivants:



Comment enseigner au climat ?

Dans ce manuel pour enseignants, notre objectif est de permettre aux élèves de participer activement en classe à travers l'élaboration de problématiques, l'expérimentation, l'observation, l'apprentissage par l'erreur, le débat et la mise en œuvre de solutions locales et concrètes pour répondre aux problèmes liés aux changements climatiques. Cet « apprentissage actif » peut revêtir différentes formes. **Les deux approches que nous conseillons vivement sont la démarche d'investigation et la pédagogie de projet.**

QU'EST-CE QUE LA DÉMARCHE D'INVESTIGATION ?

- S'il serait trop simpliste de réduire la démarche d'investigation à un modèle linéaire d'apprentissage, mais on distingue généralement plusieurs étapes:
 1. **Formulation d'une problématique** : le questionnement, lancé par l'enseignant ou les élèves, à partir d'une observation faite ou d'un paradoxe.
 2. **Formulation d'hypothèses et investigation** : cela peut se faire par le biais d'expériences, d'enquêtes, d'observations ou d'études documentaires.
 3. **Structuration des connaissances** : réflexion sur les informations ou les données rassemblées. L'objectif est de vérifier les hypothèses et de tirer des conclusions générales, qui peuvent à leur tour susciter de nouveaux questionnements.

QU'EST-CE QUE LA PÉDAGOGIE DE PROJET ?

La pédagogie de projet est un concept d'apprentissage actif à part entière évoqué pour la première fois au début du 20^e siècle par John Dewey, qui a également décrit la démarche d'investigation.

La pédagogie de projet est devenue une méthode d'enseignement qui aborde un sujet en faisant appel à un apprentissage rigoureux, pertinent et pratique. Les projets sont généralement formulés sous forme de questions ouvertes qui encouragent les élèves à enquêter, à faire des recherches et à élaborer des solutions sous la forme de **productions concrètes**. *Par exemple : organiser un Climathon dans son établissement.*

Le principal atout de ces deux approches (investigation et projet) est l'apprentissage dans un cadre **qui a un sens aux yeux des élèves**. En outre, l'aspect pratique est généralement un facteur de motivation. Ils développent alors des compétences transversales, telles que la capacité à prendre des décisions ou à planifier. Ils comprennent également que les erreurs et les échecs font partie intégrante du processus d'apprentissage et que la coopération est la clé de la réussite. Enfin, le résultat servira peut-être d'inspiration à d'autres classes, familles et communautés.

LES ATOUTS DE L'APPROCHE GLOBALE ET SOCIO-ÉMOTIONNELLE

Si les disciplines scientifiques « traditionnelles » sont essentielles pour comprendre les mécanismes physiques et biogéochimiques des changements climatiques ainsi que leurs conséquences, les sciences humaines et sociales permettent aux élèves de comprendre les enjeux sociaux, politiques et économiques du développement durable et de la justice climatique. Les disciplines artistiques et linguistiques sont également précieuses pour encourager les élèves à exprimer leurs sentiments et à participer à certaines formes d'action (comme la sensibilisation du public). L'ingénierie et les disciplines pratiques telles que l'agriculture et la technologie entrent aussi en jeu dans l'élaboration des solutions. **Enseigner les changements climatiques, c'est prendre en compte toutes ses dimensions, ce qui nécessite une approche pluridisciplinaire.**

Chez les jeunes du monde entier, la question des changements climatiques suscite une forte mobilisation souvent associée à des émotions extrêmes, notamment chez les plus jeunes, qui évoquent « l'effondrement de la civilisation » ou « la fin de la planète ». Le terme « éco-anxiété » a été inventé pour décrire cette angoisse climatique (Glenn Albrecht).

Nous proposons ici de reconnaître et de limiter cette éco-anxiété par les moyens suivants :

- **Éduquer aux changements climatiques** : sans nier la gravité et les enjeux, se concentrer sur les faits (voir Séquence A - Le système climatique de la Terre). Cette approche est importante mais pas suffisante, compte tenu de la forte charge émotionnelle des conséquences des changements climatiques.
- Encourager les élèves à **accepter leurs émotions** et à les **partager** avec autrui plutôt que de rester isolés (voir la séance D2 du manuel « Changement climatique et terres émergées » dans la collection « Le Climat entre nos mains »). 
- Réaliser qu'il est nécessaire, et possible, **d'agir à différents niveaux** : l'individu, l'école, la communauté, etc. (voir Séquence C - Des modèles climatiques pour prédire l'avenir).
- Encourager les élèves à **participer à un plan d'action concret** par le biais de projets (voir la partie « Agir » des manuels « Océan et cryosphère » et « Changement climatique et terres émergées » de la collection « Le climat entre nos mains ») qui proposent des solutions d'atténuation ou d'adaptation. 

DISCIPLINES
CONCERNÉESPhysique
SVT
Géographie

DURÉE

Préparation : 10 min
Activité : 2 h

TRANCHE D'ÂGE

13-18 ans

MÉTHODE
PÉDAGOGIQUE

Analyse documentaire

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves examinent la différence entre climat et météo. Les scientifiques utilisent des paramètres physiques pour décrire le climat. Ceux-ci doivent être considérés simultanément lorsque l'on étudie le climat (H_2O , CO_2 , température, albédo, gaz à effet de serre, etc.). Les élèves étudient l'évolution de ces paramètres, qui sont tous – à des échelles différentes – des marqueurs des changements climatiques.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 2 – S'ouvrir à la complexité dans la durabilité
Compétence 2.1 – Pensée systémique



CONCEPTS ABORDÉS

Météo, climat, paramètres, changement climatique, événements météorologiques extrêmes, fiabilité

PRÉPARATION 10 MIN

- Imprimez le globe et les cartes de la **FICHE 1.1** (une par élève), si possible au format A3 pour laisser plus de place à leurs réponses.
- Imprimez les **FICHES 1.2 à 1.6** (une par groupe d'élèves).
- Facultatif : vous pouvez imprimer la **FICHE 1.1, CORRIGÉ**, pour fournir à l'élève en fin de séance un corrigé de l'ensemble des ateliers.

INTRODUCTION 30 MIN

Cas n°1: Si vous vivez dans une région du monde avec un climat saisonnier (été/hiver ou humide/sec), commencez par demander aux élèves : *comment êtes-vous habillé aujourd'hui ? Qu'en était-il la semaine d'avant, le mois d'avant ou lors de vos dernières vacances ? Qu'est-ce qui vous pousse à choisir un vêtement plutôt qu'un autre ?* Ils vous répondront que tout dépend du temps qu'il fait : s'il fait beau, s'il pleut, s'il fait chaud ou froid. *Qu'en est-il des différentes régions du monde ? Comment distinguer climat et météo ?*

Cas n°2: Si vous vivez dans une région où le climat n'est pas saisonnier : *Le temps est-il identique toute l'année ? Est-il le même que partout ailleurs dans le monde ? D'autres régions ont-elles les mêmes températures ou les mêmes précipitations ? Comment distinguer climat et météo ?*

Pour faire un rappel des concepts de climat et de météo, n'hésitez pas à commencer cette séquence de manière ludique en regardant la vidéo de « Climat Elvis », une chanson de Josh Willis.



VISIONNER LA VIDÉO ➔



1. Pour tester si les élèves ont compris la différence entre la météo et le climat, lisez les phrases proposées. Les élèves doivent dire si ces affirmations concernent le climat ou la météo, et expliquer leur choix (la réponse est indiquée entre parenthèses pour chaque phrase).

« Regarde par la fenêtre, le soleil brille désormais à travers les nuages et c'est magnifique. » (MÉTÉO)

« Ma grand-mère me dit que quand elle était petite, il y avait toujours de la neige l'hiver. Parfois, cela l'empêchait même d'aller à l'école ! » (CLIMAT)

« Il y aura beaucoup de vent ce weekend. Nous pourrions essayer notre nouveau cerf-volant » (MÉTÉO)

« Mon ami australien a fait une bataille d'eau dans son école, il fait toujours chaud là-bas ! » (CLIMAT)

« Il a plu le 8 mai. » (MÉTÉO)

2. Demandez à vos élèves de reformuler la différence entre climat et météo (référez-vous aux concepts et aux définitions dans le glossaire). **Le climat vous indique quels vêtements acheter, et la météo, comment vous habiller !**



Les élèves travaillent en groupes : ils jouent le rôle du groupe des « botanistes » et remplissent les cases correspondant à leurs documents.

DÉROULEMENT 1 H

1. À partir de l'activité précédente, les élèves auront sûrement constaté que la météo peut changer rapidement. Demandez-leur : *Pensez-vous que le climat a changé ? Rapidement ou non ? Comment le prouver, puisque cela se produit sur un temps très long ?* Les élèves vont mener une recherche documentaire pour répondre à ces questions.
2. Montrez la **FICHE 1.1** à la classe et distribuez à chaque élève un exemplaire qu'il va compléter pendant la séance.
3. Répartissez les élèves en groupes de quatre maximum, et expliquez-leur que chaque groupe représente un type d'experts du climat (océanographes, glaciologues, botanistes, etc.). Distribuez les **FICHES 1.2 à 1.6** (une par groupe). À l'aide des documents, les élèves devront compléter les cartes de la **FICHE 1.1** correspondant à leur expertise et les placer sur la page « Les composantes du système climatique ». Ils devront trouver les paramètres physiques et les échelles étudiés, et expliquer brièvement les preuves des changements climatiques. Chaque groupe analyse ses documents et en discute.
4. En commun désormais, un membre de chaque groupe présente oralement ses conclusions et complète les cases correspondant à sa spécialité sur la **FICHE 1.1**, par exemple projetée au tableau.

NOTE À L'ENSEIGNANT

Dans cette séance, l'échelle temporelle peut perturber la compréhension des élèves. En effet, les jeunes (et les moins jeunes !) ont tendance à n'appréhender que les événements directement liés à leur vie personnelle. Mais les changements dus au réchauffement climatique sont souvent graduels et ne peuvent être observés que sur de longues périodes (30 ans, 100 ans ou plus). Ils peuvent donc être difficiles à percevoir. Voici quelques conseils pour vous aider :

- ~ Commencez par des exemples concrets, puis introduisez progressivement des changements d'échelle ;
- ~ Utilisez des exemples connus des élèves (actualités et/ou autres exemples proposés par les élèves) ;
- ~ Les analogies peuvent être utiles pour aider les élèves à mieux comprendre les ordres de grandeur (exemple **FICHE 1.2, DOCUMENT 1** : comparez 120 ans sur l'axe horizontal avec la durée de vie moyenne d'un être humain dans votre pays).

CONCLUSION 30 MIN

Concluez que les scientifiques utilisent des **paramètres physiques et biogéochimiques** pour étudier la météo ou le climat : température (°C ou °F), humidité relative (pourcentage de vapeur d'eau dans l'air), précipitations (millimètres d'eau par heure), concentration des gaz à effet de serre : H₂O, CO₂, CH₄ (ppm), aérosols ou concentration de polluants (µg/m³), glace (volume en gigatonnes, ou surface en km²), etc.

Les paramètres physiques sont **les mêmes** pour la météo et le climat, à l'exception de certains paramètres **à évolution lente** (par exemple la surface des glaces), qui sont plus pertinents pour le **climat**. À l'inverse, certains paramètres **à court terme** (comme les précipitations) sont plus pertinents pour l'étude de la **météo**.

Chaque spécialiste étudie un **ensemble de paramètres physiques** (ex. le glaciologue étudie le volume de glace et l'albédo). Cela peut être illustré en regardant la vidéo CLIM « Le système climatique de la Terre », dans laquelle Fiona O'Connor (MET Office Science, Royaume-Uni) explique comment elle prend en compte un ensemble de paramètres (vapeur d'eau, eau liquide, concentration de méthane) pour étudier la chimie atmosphérique.



VISIONNER LA VIDÉO ↗

Ces paramètres physiques doivent être pris en compte **simultanément pour l'étude du climat** (et pour la lutte contre les changements climatiques !). Ils peuvent être utilisés pour décrire les tendances à l'échelle mondiale, ou à plus petite échelle (régionale, par exemple). **Quoiqu'il en soit, les météorologues et les climatologues doivent étudier un ensemble de paramètres de manière simultanée afin de décrire leur évolution.**

Concluez en soulignant que, tout comme la météo varie d'un jour à l'autre, **le climat a changé au cours du siècle dernier : ce sont les changements climatiques**. Il existe des preuves scientifiques solides que le climat a changé dans diverses régions du monde : la température globale et le niveau de la mer ont augmenté, les glaciers et la banquise fondent, les fleurs éclosent plus tôt, les sécheresses et les fortes pluies sont plus intenses et fréquentes, etc.

Vous pouvez également citer le GIEC comme l'une des sources d'information les plus fiables sur les changements climatiques.



LES COMPOSANTES DU SYSTÈME CLIMATIQUE



BOTANISTES
DOCUMENT 9
 Paramètres physiques :
 Échelle (locale, globale, régionale ?) :
 Preuve du changement climatique :

FICHE 1.1 CARTES



OCÉANOGRAPHERS DOCUMENT 1

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

OCÉANOGRAPHERS DOCUMENT 2

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

HYDROLOGUES DOCUMENT 7

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

PHYSICIENS DE L'ATMOSPHÈRE DOCUMENT 3

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

PHYSICIENS DE L'ATMOSPHÈRE DOCUMENT 4

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

HYDROLOGUES DOCUMENT 8

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

GLACIOLOGUES DOCUMENT 5

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

GLACIOLOGUES DOCUMENT 6

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

BOTANISTES DOCUMENT 9

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :

BOTANISTES DOCUMENT 10

Paramètres physiques :

Échelle (locale, mondiale, régionale?) :

Preuve du changement climatique :





Océanographes
DOCUMENT 1

Paramètres physiques : niveau de la mer (mm).

Échelle : mondiale.

Preuve du changement climatique : depuis 1900, le niveau de la mer a augmenté d'environ 200 mm en moyenne à l'échelle mondiale. Cette élévation est très régulière dans le temps.

Océanographes
DOCUMENT 2

Paramètres physiques : anomalies de température (°C).

Échelle : mondiale.

Preuve du changement climatique : la différence entre la température moyenne en 2022 et la température moyenne sur la période 1880-2010 est positive. Cela suggère la présence d'un réchauffement par rapport à la fin du 19^e siècle. Celui-ci est plus marqué sur les continents et aux hautes latitudes.

Physiciens de l'atmosphère
DOCUMENT 3

Paramètres physiques : concentration atmosphérique de CO₂ (ppm).

Échelle : mondiale.

Preuve du changement climatique : la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté depuis la révolution industrielle. De grandes quantités de CO₂ ont été émises dans l'atmosphère en raison des activités humaines. Ce CO₂ atmosphérique supplémentaire amplifie l'effet de serre naturel, contribuant ainsi au réchauffement de la planète.

Physiciens de l'atmosphère
DOCUMENT 4

Paramètres physiques : anomalie de température pendant l'été 2023 (°C).

Échelle : régionale (Europe).

Preuve du changement climatique : les anomalies de température sont positives dans la majeure partie de l'Europe pour l'été 2023 (par exemple, entre +1°C et +3°C en France, en Espagne et en Suisse, avec des vagues de chaleur dans plusieurs pays européens). Cela indique que les températures observées sont plus chaudes que les températures de référence.

Glaciologues
DOCUMENT 5

Paramètres physiques : données qualitatives provenant de l'observation des glaciers sur le terrain, taille de la cryosphère (tonnes de glace).

Échelle : une conclusion à l'échelle mondiale peut être tirée à partir d'observations de nombreuses parties du monde (calotte glaciaire en Alaska, en Antarctique, au Groenland).

Preuve du changement climatique : les calottes glaciaires rétrécissent partout dans le monde : chacune perd plusieurs milliards de tonnes de glace continentale chaque année. C'est un signe du réchauffement climatique et de l'élévation du niveau des mers.

Glaciologues
DOCUMENT 6

Paramètres physiques : superficie de la banquise arctique (millions de km²), index de l'albédo de la glace de mer (millions de km²).

Échelle : régionale (Arctique).

Preuve du changement climatique : l'étendue de la banquise arctique diminue depuis au moins 1979. L'albédo de l'ensemble de la région arctique diminue également. Le réchauffement climatique est responsable de la fonte de la banquise, qui réduit l'albédo. En conséquence, l'océan Arctique absorbe davantage de rayonnement solaire, et se réchauffe donc encore plus.

Hydrologues
DOCUMENT 7

Paramètres physiques : tendances des précipitations au-dessus des continents entre 1951 et 2010 (% par décennie).

Échelle : régionale et mondiale.

Preuve du changement climatique : depuis 1951, les précipitations ont augmenté dans certaines régions, telles que le nord de l'Europe et l'est des États-Unis (par exemple, +4 % par décennie au Royaume-Uni entre 1951 et 2010). En revanche, les précipitations ont diminué autour de la Méditerranée, en Afrique de l'Ouest ou en Asie du Sud-Est (-10 % par décennie au Sénégal, par exemple). Le changement climatique a donc un impact sur les régimes des pluies, qui sont modifiés partout dans le monde, et ce de manière très différente.

Hydrologues
DOCUMENT 8

Paramètres physiques : anomalies de température (°C) sur les continents et sur les océans depuis 1880.

Échelle : mondiale.

Preuve du changement climatique : les anomalies de température sur les continents ont augmenté de près de 2°C depuis 1880, ce qui confirme le réchauffement de la planète. L'évaporation et l'évapotranspiration étant fonction de la température, ces dernières augmentent avec le réchauffement climatique.

Botanistes
DOCUMENT 9

Paramètres physiques : flux de carbone (flèches, sans unité) et réservoirs (chiffres, % de carbone stocké).

Échelle : régionale et mondiale.

Preuve du changement climatique : en raison du changement climatique, les régimes des précipitations changent partout dans le monde. Cela affecte les sols et l'activité des végétaux : les flux et les réservoirs de carbone sont modifiés dans de nombreux écosystèmes. Ce n'est qu'un exemple de la façon dont les activités humaines modifient le cycle du carbone de la Terre.

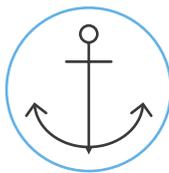
Botanistes
DOCUMENT 10

Paramètres physiques : période de floraison au Japon, nombre mondial d'événements extrêmes.

Échelle : locale (Japon) et mondiale.

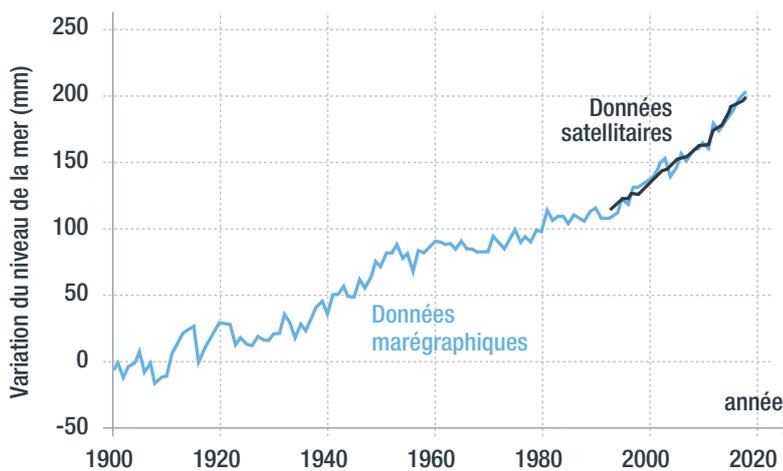
Preuve du changement climatique : la date du début de la floraison des cerisiers japonais est passée de fin avril en 1550 à début avril dans les années 2000. Le réchauffement climatique entraîne une floraison plus précoce des plantes.

Le nombre d'événements extrêmes n'a cessé d'augmenter depuis 1960. On en déduit que leur fréquence augmente avec les changements climatiques, causant des dommages importants à l'environnement et aux végétaux (incendies, sécheresses, inondations, etc.), entre autres.



OCÉANOGRAPHES

→ Vous êtes des scientifiques spécialistes des océans et vous avez constaté l'évolution du niveau des mers au cours du siècle dernier.



DOCUMENT 1. VARIATION DU NIVEAU DE LA MER DEPUIS 1900

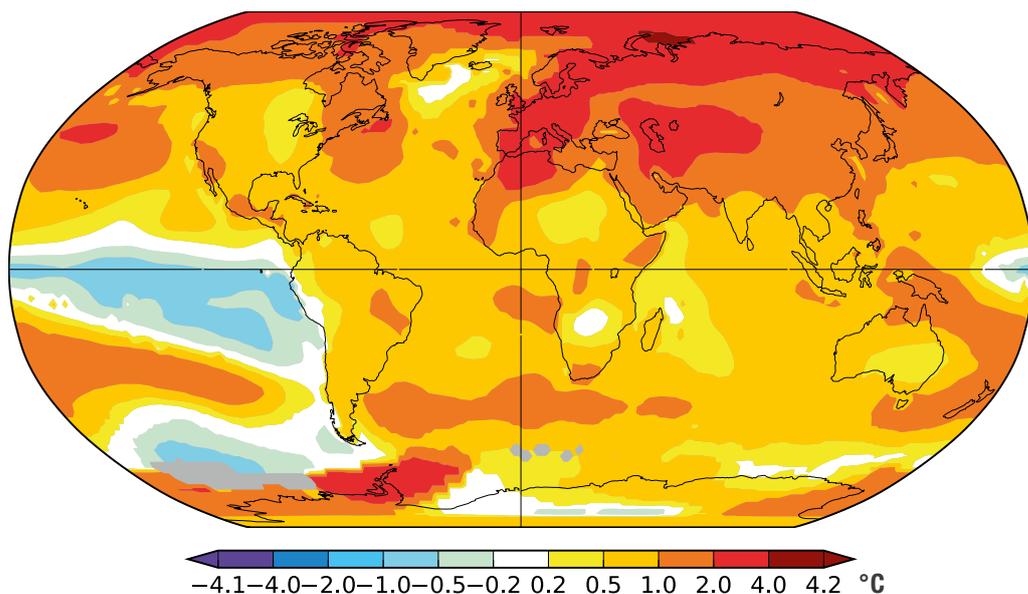
Les mesures ont été obtenues à l'aide de satellites en orbite autour de la Terre et par l'enregistrement continu du niveau des mers.

Les données plus anciennes proviennent des marégraphes côtiers. Un marégraphe est un appareil d'enregistrement qui mesure le niveau d'une mer – ou d'une rivière – à un endroit précis, pendant un certain temps.

Adapté des sources du Goddard Space Flight Center et du PO.DAAC de la NASA. Source : Frederikse et al (2020), publié sur le site de la NASA (en anglais) : (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>).

DOCUMENT 2. ANOMALIES DE TEMPERATURE MOYENNE À LA SURFACE DE LA TERRE EN 2022

La carte montre les anomalies de température (en degré Celsius, °C), soit dans ce cas, la différence entre la température moyenne annuelle en 2022 et la température moyenne sur la période 1880-2010.



Sources: 2023, Land Surface Air Temperature: GHCNv4, Sea Surface Temperature: ERSST_v5. Publié sur le site web de la NASA (en anglais) : (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>).

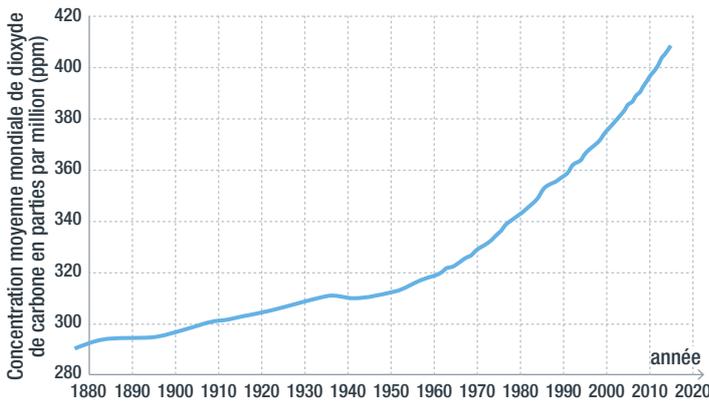
La NASA met également à disposition une vidéo aidant à visualiser l'augmentation de la température depuis 1880 : <https://svs.gsfc.nasa.gov/4882>



PHYSICIENS DE L'ATMOSPHÈRE

→ En tant que physiciens de l'atmosphère, vous aimeriez savoir comment les températures de l'atmosphère et sa composition ont évolué au fil du temps.

DOCUMENT 3. CONCENTRATION MOYENNE MONDIALE DE DIOXYDE DE CARBONE EN PPM

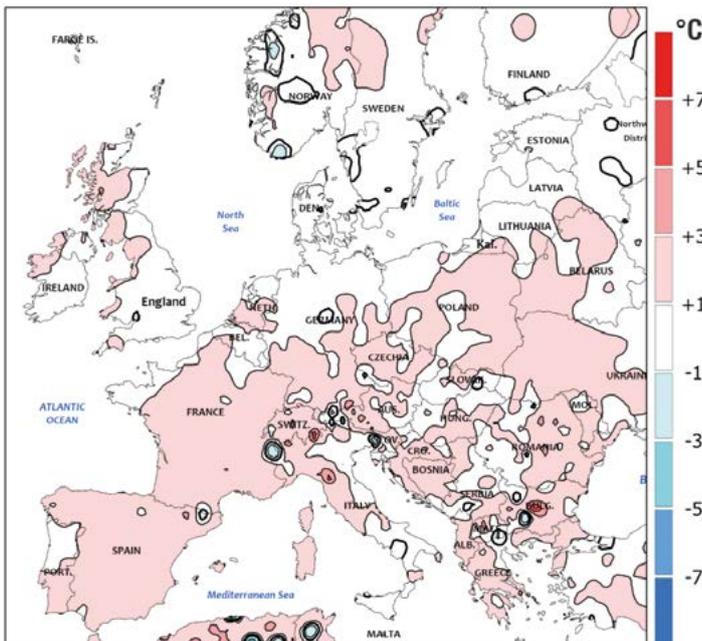


Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre. Le rayonnement solaire traverse en partie l'atmosphère avant d'être absorbé par la surface de la Terre, ce qui la réchauffe. Ce rayonnement solaire absorbé est transformé en rayonnement émis par la surface de la Terre (chaleur). Une partie du rayonnement émis par le sol est en partie piégée par les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, ce qui réchauffe d'autant plus la planète.

Depuis la révolution industrielle, le progrès technique ne s'est pas cantonné à la machine à vapeur : il a induit des changements scientifiques, technologiques, économiques et politiques sans précédent qui affectent tous les secteurs de la société humaine. Ces développements ont contribué à une augmentation inédite de la population humaine. L'augmentation de la population et de la consommation d'énergie a contribué à accroître les émissions de gaz à effet de serre.

Adapté de la NOAA. Source : ESRL/ETHZ/NCEI (2021). Publié sur le site web de la NOAA (en anglais) : (<https://www.climate.gov/media/13560>).

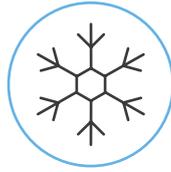
DOCUMENT 4. ANOMALIE DE TEMPÉRATURE À L'ÉTÉ 2023



Dans ce cas, l'anomalie de température est la différence entre une période de trois mois (de juin à août 2023) et la température moyenne à long terme. Une anomalie positive indique que la température observée était plus chaude que la valeur de référence, tandis qu'une anomalie négative indique que la température observée était plus froide que la valeur de référence.

En juillet 2023, l'Europe a connu un temps exceptionnellement chaud, avec des records de température atteints en France, en Allemagne et en Espagne. Les phénomènes météorologiques extrêmes sont des événements inhabituels pour un lieu donné : ouragans violents, sécheresses, températures extrêmes, vagues de chaleur, précipitations torrentielles, crues soudaines, etc. Les experts du GIEC nous disent que la fréquence et/ou l'intensité de nombreux événements extrêmes augmentent en raison des changements climatiques.

Publié sur le site web de la NOAA (en anglais) : (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/regional_monitoring/europe.shtml).



GLACIOLOGUES

→ Vous êtes des scientifiques spécialistes des glaciers, qui étudient l'impact des changements climatiques sur ces derniers.

DOCUMENT 5. L'ÉVOLUTION DE LA GLACE CONTINENTALE



La glace continentale représente l'ensemble de la glace et de la neige sur le continent. Elle comprend les glaciers, les calottes glaciaires, la neige saisonnière, les lacs et rivières gelés ainsi que le pergélisol (sol, roches ou sédiments gelés en permanence pendant au moins deux années consécutives).

Sources : à gauche : août 1941. Le glacier Muir photographié par le glaciologue William O. Field. À droite : août 2004. Le glacier Muir photographié par le géologue Bruce F. Molnia de l'United States Geological Survey (USGS). Publié sur la banque d'images Global Climate Change de la NASA. (<https://climate.nasa.gov/interactives/global-ice-viewer#/1/4>).

QUELLE QUANTITÉ DE GLACE PERDONS-NOUS ACTUELLEMENT ?



303 MILLIARDS DE TONNES DE GLACE APPARTENANT À LA CALOTTE GROENLANDAISE PERDUES EN 2014

Quelle quantité d'eau cela a-t-il ajouté à nos océans ? Une piscine olympique mesure 25 mètres de large, 2 mètres de profondeur et 50 mètres de long. Pour contenir 303 gigatonnes, cette piscine devrait mesurer un peu plus de 6 milliards de mètres de long : cela représente 16 allers-retours Terre-Lune. La calotte glaciaire du Groenland contient suffisamment de glace pour élever le niveau marin de six mètres.

118 MILLIARDS DE TONNES DE GLACE APPARTENANT À L'ANTARCTIQUE PERDUES EN 2014

La calotte Antarctique recouvre environ 5,4 millions de kilomètres carrés, une superficie supérieure à celle des États-Unis et de l'Inde réunis. Cette calotte contient suffisamment de glace pour faire monter les mers de près de 56 mètres. Sa partie ouest constitue la plus grande menace susceptible de provoquer une hausse rapide du niveau marin. En 2014, deux études ont montré que la fonte des glaciers de la région était en cours, sans pouvoir prédire exactement le temps qu'elle prendrait.



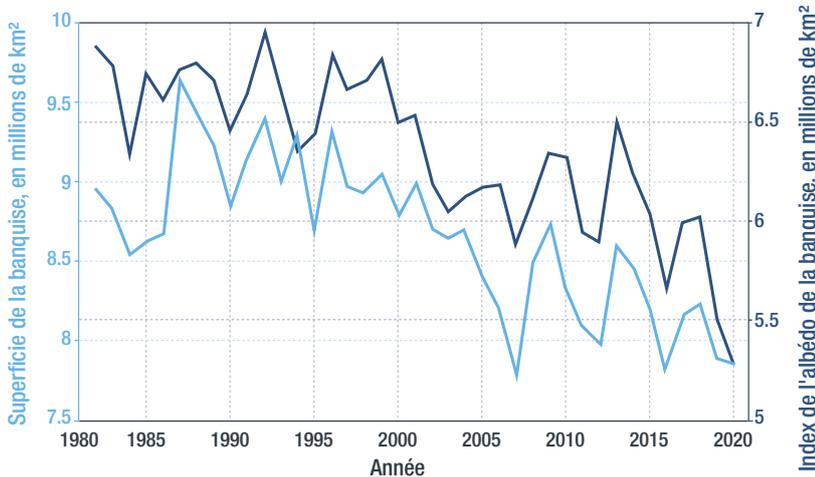
PENDANT CE TEMPS, EN ALASKA...

Les relevés aériens réalisés en Alaska et au Canada entre 1994 et 2013 ont montré une perte de 75 milliards de tonnes de glace par an, ce qui est suffisant pour recouvrir tout l'État de l'Alaska sur une hauteur de 30 cm pendant 7 ans.

PLUS RÉCEMMENT Les scientifiques estiment à 287 milliards de tonnes la perte annuelle de glace du Groenland entre avril 2002 et août 2016. L'Antarctique a perdu, de son côté, environ 125 milliards de tonnes par an durant cette même période.

Source : Adapté de la NASA. Publié sur la banque d'images Global Climate Change de la NASA, en anglais : (https://climate.nasa.gov/climate_resources/125/in-fographic-sea-level-rise/).

DOCUMENT 6. ÉVOLUTION DE LA SUPERFICIE DE LA BANQUISE ET DE L'ALBÉDO DE MARS À SEPTEMBRE EN ARCTIQUE



L'océan Arctique est partiellement recouvert de banquise, c'est-à-dire d'eau de mer gelée formée à la surface de l'océan.

L'albédo (« blancheur » en grec) représente la proportion du rayonnement solaire qui est réfléchi par un objet ou une surface. Lorsque les rayons du soleil sont réfléchis vers l'espace, ils ne réchauffent pas la surface de la Terre.

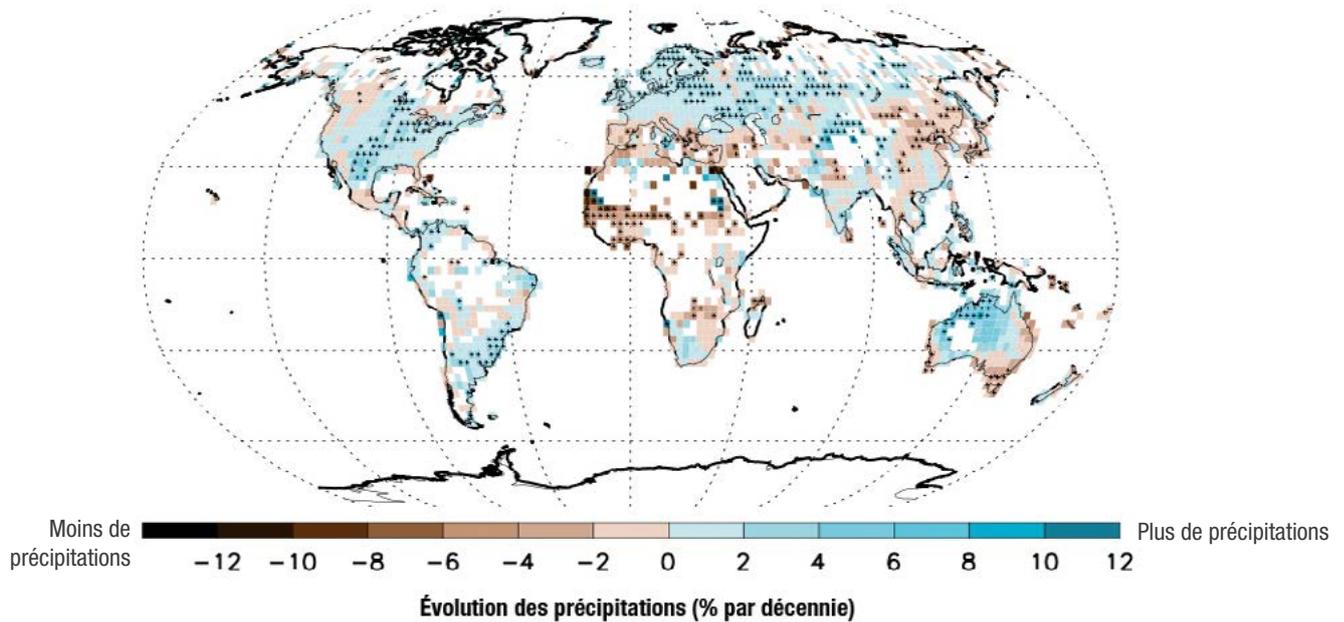
Source : adapté de Hao, H. et al, Radiative Effects and Costing Assessment of Arctic Sea Ice Albedo Changes (2023, en anglais). Étude publiée sur le site web du MDPI (en anglais, licence CC) : (<https://www.mdpi.com/2072-4292/15/4/970>).



HYDROLOGUES

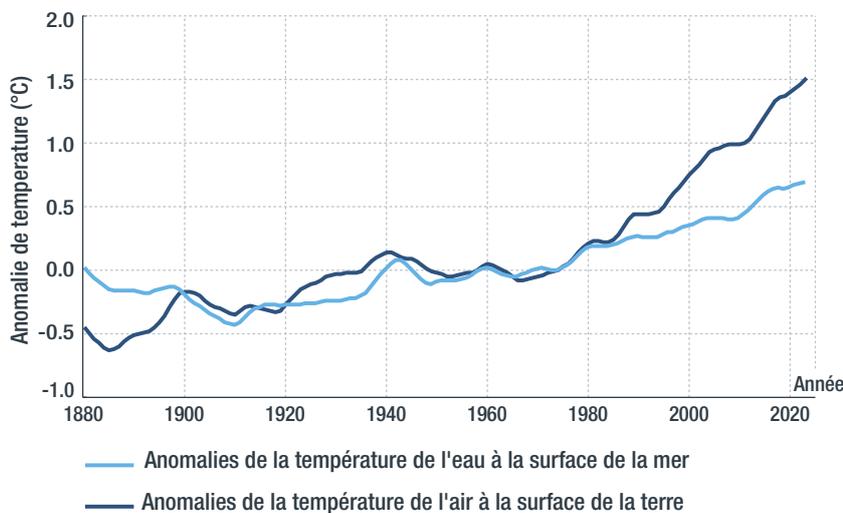
→ Vous êtes des scientifiques spécialistes du cycle de l'eau. Vous vous intéressez aux précipitations, aux eaux de surface et à l'évaporation.

DOCUMENT 7. ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS AU-DESSUS DES CONTINENTS ENTRE 1951 ET 2010



Adapté du GIEC. Source : 2013, Rapport d'évaluation 5, Groupe de travail 1 (The Physical Science Basis). Publié sur le site web du GIEC (en anglais) (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).

DOCUMENT 8. ANOMALIES DE TEMPÉRATURE À LA SURFACE DES CONTINENTS ET DES OCÉANS DEPUIS 1880



Source: 2024, NASA/GISS/GISTEMP v4. Adapté de la NASA (en anglais): (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/)

Ces données ont été obtenues à partir de différentes mesures réparties sur l'ensemble du globe. Les courbes montrent les anomalies de température, soit dans ce cas, la différence entre la température moyenne annuelle et la température moyenne à long terme (1951-1980).

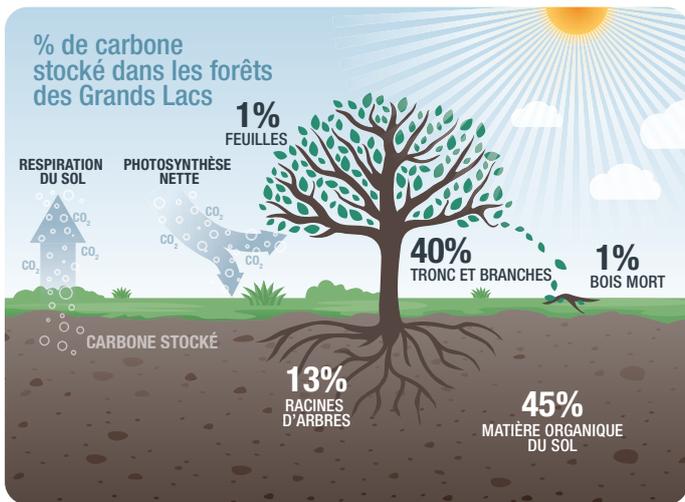
L'évaporation de l'eau est son passage de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état de l'eau se produit sur les océans comme sur les continents (lacs, sols, etc.). Les végétaux perdent également de l'eau lorsqu'ils sont au soleil. Ils transpirent, produisant des gouttelettes d'eau qui s'évaporent : ce phénomène est connu sous le nom **d'évapotranspiration**. L'évaporation et l'évapotranspiration dépendent de la **température**, de la **quantité d'eau** dans le sous-sol et du **type de végétation**.



BOTANISTES

→ Vous êtes des spécialistes des végétaux, et vous étudiez leurs liens avec les changements climatiques.

DOCUMENT 9. LES VÉGÉTAUX INTERVIENNENT DANS LE CYCLE DU CARBONE

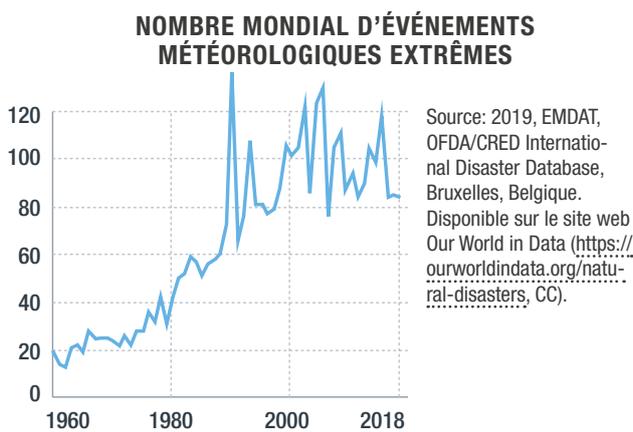
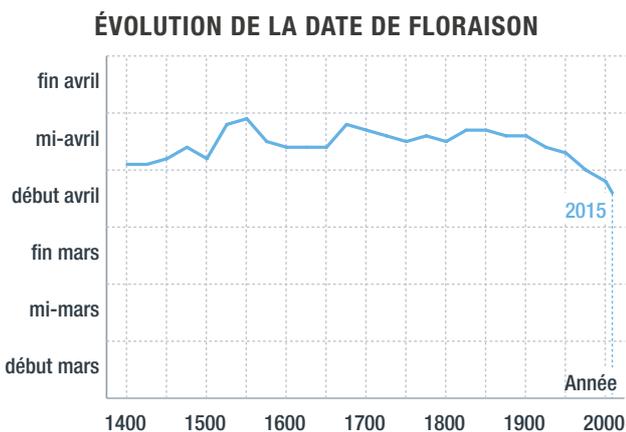


Avec l'énergie lumineuse, les plantes utilisent le CO₂ de l'atmosphère pour leur croissance : c'est la **photosynthèse**. En respirant jour et nuit, les plantes rejettent du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (c'est la **respiration**). Le reste du carbone est stocké dans les feuilles, les troncs, les racines et le sol : tous ces éléments sont des **réservoirs de carbone**. Les jeunes forêts en croissance constituent un important **puits de carbone** sur Terre : il y a un **flux** de carbone de l'atmosphère vers la matière organique des arbres. Il a récemment été démontré que les forêts anciennes sont également des puits de carbone. Les deux types de forêts en stockent une immense quantité : ce sont des **réservoirs de carbone**.

Le carbone circule ainsi entre les différents réservoirs de la Terre : atmosphère, biosphère, sol, etc. Il s'agit du **cycle du carbone** dans lequel les plantes jouent un rôle majeur.

Selon les experts du GIEC, le changement climatique modifie les régimes de précipitations dans le monde entier. Cela affecte les sols et les végétaux : les flux et les réservoirs de carbone sont modifiés dans de nombreux écosystèmes.

DOCUMENT 10. LES VÉGÉTAUX SONT AFFECTÉS PAR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES



La floraison a lieu lorsqu'il fait suffisamment chaud. Le graphique ci-dessus montre l'évolution de la date de floraison des cerisiers au Japon sur une période de 600 ans.

Source : 2015, adapté d'Aono et Kazui, 2008 ; Aono et Saito, 2010 ; Aono, 2012, Aono 2012 ; Chikyu Kankyo (Global Environment), 17, 21-29. Étude publiée sur le site web de Yasuyuki Aono, en anglais (<http://atmenvi.osakafu-u.ac.jp/aono/kyophenotemp4/>).



Feux de forêt Pluies torrentielles Sécheresses Vagues de chaleur

ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

SÉQUENCE A – LE SYSTÈME CLIMATIQUE DE LA TERRE

SÉANCE 2 LES LOIS DE LA PHYSIQUE¹

DISCIPLINES CONCERNÉES
Physique
SVT

DURÉE
Préparation : 10 min (hors expériences facultatives)
Activité : 1h30 (plus quelques heures pour les expériences facultatives)

TRANCHE D'ÂGE
Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE
Expériences
Étude documentaire

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Quelques expériences (certaines obligatoires, d'autres facultatives) sur une sélection de paramètres énumérés dans la séance précédente, visent à comprendre que chacun d'entre eux dépend (ou « est fonction ») de plusieurs autres. Cette dépendance peut être facilement démontrée.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 2 – S'ouvrir à la complexité dans la durabilité
Compétence 2.3 – Cadrage des problèmes



CONCEPTS ABORDÉS

Rayonnement visible, rayonnement infrarouge, absorption, émission, opacité

PRÉPARATION 10 MIN

- Imprimez les **FICHES 2.1 à 2.6** (une par élève).
- Imprimez les **FICHES** correspondant aux expériences facultatives (voir ci-dessous).

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

Au lycée, quelle que soit la spécialité de l'élève, la notion de « fonction mathématique » est obligatoirement présente dans le programme (que ce soit par le calcul de dérivées, la lecture d'un graphique ou l'utilisation de tableaux de données). L'objectif ici est simplement d'introduire l'idée que chacun des paramètres physiques utilisés dans les modèles climatiques peut être décrit comme étant une fonction d'un ou plusieurs autres paramètres. Par exemple, l'évaporation de l'eau dépend de la température de l'air, de la température de l'eau, de la vitesse du vent, de l'humidité de l'air, etc.

Cette séance peut être menée de plusieurs façons : les élèves peuvent réaliser eux-mêmes les expériences, en partie ou en totalité, ou bien effectuer une étude documentaire ; la classe entière peut travailler sur le même sujet pendant plusieurs séances d'affilée, ou être divisée en groupes pour étudier parallèlement plusieurs aspects, avant de collaborer à la fin de la séance. La première partie de la séance (obligatoire) porte sur l'effet de serre, une notion peu intuitive. Elle implique l'utilisation d'une caméra thermique professionnelle, dont les images sont ici fournies aux élèves.

INTRODUCTION 5 MIN

Dans la séance précédente, les élèves ont passé en revue les nombreux paramètres à prendre en compte dans l'étude des changements climatiques. Deux questions se posent à présent : *Comment ces paramètres varient-ils ? Plus important encore, en quoi sont-ils impliqués dans l'effet de serre ?*

DÉROULEMENT 1H20

PARTIE 1: QU'EST-CE QUE L'EFFET DE SERRE ? 50 MIN

Que les élèves réalisent les expériences ou discutent à partir des différentes fiches, la séance doit être menée telle qu'indiqué afin que toutes les lois de la physique concernées soient bien comprises.

FICHE 2.1 – DOCUMENT 1

Que voient vos yeux ?

Tous les objets présentés ici sont chauds et émettent de la lumière. Plus précisément, **l'intensité et la couleur du rayonnement émis dépendent de la température de l'objet.**

FICHE 2.1 – DOCUMENT 2

Que voit cette caméra spéciale ?

À l'écran de la caméra, le reste du métal chauffé est visible (dans l'obscurité, les parties qui ne sont pas directement sous la flamme ne le sont pas : leur température est inférieure à 700 °C). L'écran affiche une gamme de couleurs, qui semble indiquer la température. Nous pourrions être tentés de croire que cette caméra mesure les températures ! (Le nom « caméra thermique » n'arrange pas les choses).

1 Un grand merci au Dr. Valentin Maron, chercheur en didactique de la physique à l'INSPÉ de Toulouse, laboratoire de l'EFTS, France. L'esprit et les photographies de cette activité sont issus de son travail.

FICHE 2.2 – DOCUMENT 3**Que s'attend-on à voir sur l'écran de la caméra spéciale ?**

Si la caméra lisait effectivement les températures, nous devrions voir l'homme dans des couleurs vives (puisque'il est à 35-37 °C), et le reste de la scène dans une teinte plus sombre (cette dernière étant probablement entre 15 et 20 °C).

FICHE 2.2 – DOCUMENT 4**Que montre réellement la caméra spéciale ?**

Nous voyons l'homme en couleurs vives, mais le reste de la scène n'est pas totalement sombre ! Et nous voyons aussi le reflet de l'homme ! Pourtant, la température de la vitre devrait être à peu près la même que celle de la pièce. La caméra détecte donc un rayonnement, **invisible à nos yeux. Ce rayonnement est appelé infrarouge (que l'on abrégera « IR »).**

Par ailleurs, l'échelle de couleurs n'est autre qu'une échelle de puissance de rayonnement : une forte puissance de rayonnement IR apparaît en jaune-blanc, tandis qu'une faible puissance apparaît en violet-noir.

FICHE 2.3 – DOCUMENT 5**Que peut-on dire des émissions infrarouges de ces tasses ?**

Au premier abord, l'interprétation de l'image est évidente : **plus l'objet est chaud, plus son rayonnement IR émis est intense.**

Demandez maintenant aux élèves de comparer la photo prise en lumière visible et celle prise en lumière IR : la lumière visible peut traverser la tasse d'eau chaude (nous pouvons deviner la couleur du pull de l'homme) comme la tasse d'eau froide. Mais ce n'est pas le cas de la lumière IR : bien que le rayonnement IR de la tasse d'eau froide soit faible, nous ne pouvons pas deviner l'émission IR de l'homme derrière.

Question : *est-ce dû à l'eau ou à la tasse en verre ?*

FICHE 2.3 – DOCUMENT 6**Quelle est le degré de transparence de ces matériaux ?**

La lumière visible traverse la vitre, la pochette plastique et la tasse d'eau. En revanche, seule la pochette plastique laisse passer le rayonnement IR, tandis que la vitre en verre et l'eau absorbent le rayonnement IR. Résumez : *nous avons vu les interactions entre la lumière (IR et visible) et la matière (solide et liquide).*

Question : *les gaz peuvent-ils émettre un rayonnement IR ? Absorber un rayonnement IR ?*

FICHE 2.4 – DOCUMENT 7**Expériences sur la transparence et les émissions de rayonnement des gaz.**

Il est évident que les gaz n'émettent pas de rayonnement visible (puisque nous ne les voyons pas) : ils sont totalement transparents à la lumière visible. En revanche, la caméra IR détecte clairement leur rayonnement IR. Nous observons que le **CO₂ émet plus de rayonnement que l'air à 30 °C.**

Enfin, les deux ballons froids sont opaques au rayonnement IR : ils absorbent le rayonnement de l'arrière-plan plus chaud et ne le laissent pas passer. Le CO₂ froid absorbe encore plus de rayonnement IR que l'air. Cela montre que le **CO₂ est un gaz à effet de serre.**

FICHE 2.5 – DOCUMENT 8**Construire un « équilibre radiatif »**

Cette fiche est un document à distribuer aux élèves pour qu'ils en discutent. Une expérience possible consisterait à mesurer la température d'un morceau de tôle ondulée placé à l'extérieur, en plein soleil. La température augmenterait jusqu'à ce qu'un plafond soit atteint. Il est néanmoins difficile de différencier précisément le rayonnement solaire réfléchi, le rayonnement solaire entrant et le rayonnement IR émis.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

L'air de la stratosphère étant plus froid que l'air à la surface de la Terre d'environ 40 °C, il convient de s'intéresser ici au « ballon de CO₂ à 5 °C » (voir FICHE 2.4).

Que se passe-t-il quand l'atmosphère terrestre contient soudain davantage de « CO₂ froid » ? L'atmosphère absorbe davantage de rayonnement IR (émis par la « planète Terre »), et moins de rayonnement IR s'échappe vers l'espace.

En conséquence, l'équilibre radiatif est perturbé. Le rayonnement sortant étant inférieur au rayonnement entrant, la température du système augmente (FICHE 2.5). Ceci entraîne une augmentation du rayonnement IR émis par la surface (FICHE 2.3 DOCUMENT 5) jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint (FICHE 2.5).

Concluez : *Davantage de CO₂ dans l'atmosphère entraîne le renforcement de l'effet de serre naturel.*

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

La FICHE 2.5 peut aider à comprendre le fonctionnement de différents phénomènes de rétroaction climatique.

Par exemple :

- Fonte des calottes glaciaires, diminution de l'albédo : le flux visible sortant (réfléchi) diminue ; en compensation, le flux IR sortant augmente (par une augmentation de la température).
- Augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère : l'H₂O est également un gaz à effet de serre, et le rayonnement est exactement le même que pour l'excès de CO₂ déjà évoqué avec la classe.

Les élèves étudieront ces deux rétroactions dans le jeu de plateau de la séance 3. Si besoin, les rétroactions sont expliquées plus en détail dans la Séance C3 du manuel « Océan et Cryosphère » : « La blancheur de la cryosphère et son albédo ».



PARTIE 2: COMMENT VARIENT LES PARAMÈTRES LIÉS AU CLIMAT ? 30 MIN

Après avoir travaillé sur la **FICHE 2.5**, les élèves sont déjà en mesure de répondre à une question : *En fonction de quoi la température de surface varie-t-elle ?* Ils devraient évoquer :

- le rayonnement solaire entrant R_{soleil}
- le rayonnement solaire réfléchi $R_{réfléchi}$
- la puissance d'émission IR $R_{émissionIR}$
- etc.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

Le **etc.** ci-dessus est très important. Il existe certains facteurs qui sont susceptibles de jouer un rôle sans pour autant avoir été remarqués par les élèves, ou clairement établis par les scientifiques, ou fait l'objet d'un consensus. Ces facteurs expliquent les divergences entre les modèles climatiques, sont à l'origine des incertitudes, expliquent les barres d'erreur, et motivent les recherches visant à déterminer leur importance.

En guise de conclusion, écrivez ceci sous forme de formule (notez les «...» qui représentent mathématiquement le **etc.**) où f signifie « est une fonction de » :

$$T_{surface} = f(R_{soleil}, R_{réfléchi}, R_{émissionIR}, \dots)$$

Expliquez aux élèves qu'eux-mêmes n'ont pas besoin de connaître l'expression exacte et complète de la fonction f (et parfois les scientifiques non plus). Des expériences simples peuvent être menées pour les trouver cependant.

À l'aide des **FICHES 2.1 à 2.4**, les élèves peuvent répondre à la question : *De quoi dépend le rayonnement IR émis par l'atmosphère ?* Il dépend des paramètres suivants :

- la température à la surface de la Terre $T_{surface}$
- la température de l'air T_{air}
- la quantité de gaz à effet de serre $m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{CH_4}, \dots$
- etc.

Ou, en formule :

$$R_{émissionIR} = f(T_{surface}, T_{air}, m_{CO_2}, m_{H_2O}, m_{CH_4}, \dots)$$

Les élèves remarqueront tout de suite que les deux formules écrites au tableau sont mathématiquement liées via les paramètres $T_{surface}$ and $R_{émissionIR}$. Cela montre qu'il existe une boucle de rétroaction dans ce système.

FICHE 2.6 – DOCUMENT 9

Qu'est-ce qui accélère l'évaporation de l'eau ?

Rappelez à la classe que parmi les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre, H_2O est en fait le plus important. En effet, il est responsable de la majeure partie de l'effet de serre, et rend possible la vie sur Terre telle que nous la connaissons en faisant passer la température de surface de $-18\text{ }^\circ\text{C}$ à $+15\text{ }^\circ\text{C}$.

Demandez-leur ensuite : *D'après vous, qu'est-ce qui pourrait favoriser ou au contraire ralentir l'évaporation de l'eau (sur un temps donné) ?*

Les élèves penseront probablement à la température de l'eau, à la vitesse du vent, à la température de l'air...

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

Les expériences suivantes pourraient être intéressantes pour estimer l'évaporation puis la condensation de l'eau : Verser un peu d'eau dans une bouteille, placer une coupelle en verre sur son goulot et y déposer un glaçon.

→ Expérience 1 : réalisez l'expérience ci-dessus en ne faisant varier que la température de l'eau à l'intérieur de la bouteille (froide, tiède ou chaude). Estimer visuellement la quantité d'eau condensée.

→ Expérience 2 : cette fois-ci, c'est la température de l'air qui varie. Prenez deux bouteilles avec de l'eau à la même température, et placez-en une au frigo. Estimer visuellement la quantité d'eau condensée sur la coupelle dans chaque cas.

Voici une question relevant de la vie quotidienne : *Qu'est-ce qui accélère le séchage du linge ?* Pour aider les élèves, distribuez la **FICHE 2.6**. Ils doivent arriver à la conclusion suivante : la quantité d'eau ($m_{H_2O-évap}$) qui s'évapore dans un laps de temps donné dépend de :

- la température de l'air T_{air}
- la température de l'eau T_{eau}
- la quantité de rayonnement solaire R_{soleil}
- la présence de vent et/ou sa vitesse V_{vent}
- l'humidité de l'air H_{air}
- la surface exposée à l'interface air/eau $S_{interface}$
- etc.

Ou, en formule :

$$m_{H_2O\ évap} = f(T_{air}, T_{eau}, R_{soleil}, V_{vent}, H_{air}, S_{interface}, \dots)$$

EXPÉRIENCES FACULTATIVES

Les expériences suivantes peuvent être réalisées dans n'importe quel ordre : elles peuvent être menées en parallèle par différents groupes, par exemple.

LE RAYONNEMENT SOLAIRE RÉFLÉCHI DÉPEND DE... 1H30

Réalisez l'expérience sur l'albédo de la séance C3 du manuel «Océan et Cryosphère» ou reportez-vous y. La conclusion est que le rayonnement solaire qu'un objet ou une surface renvoie vers l'espace dépend :

- de la quantité de rayonnement solaire atteignant l'objet ou la surface R_{soleil}
- du pouvoir réfléchissant de l'objet ou de la surface, appelée albédo : $A_{surface}$
- etc.

$$R_{renvoyé} = f(R_{soleil}, A_{surface}, \dots)$$



LES ÉMISSIONS NATURELLES DE CO₂ DÉPENDENT DE... 1H

Réalisez l'expérience sur la photosynthèse de la séance A5 du manuel « Changement climatique et terres émergées », ou reportez-vous y.



Cette expérience montre que la végétation peut agir à la fois comme un puits et comme une source de CO₂. Les plantes photosynthétiques peuvent être des puits de carbone en fonction des paramètres suivants :

- la masse des organismes photosynthétiques $m_{photosyn. org.}$
- la quantité de rayonnement solaire atteignant les plantes R_{soleil}
- etc.

$$m_{CO_2 photosyn} = f(R_{soleil}, m_{org.photosyn.}, \dots)$$

La respiration des organismes vivants (y compris les organismes photosynthétiques) peut être une source de carbone, en fonction des paramètres suivants :

- la masse des organismes vivants $m_{org.vivant}$
- etc.

$$m_{CO_2 respiration} = f(m_{org.vivant}, \dots)$$

LES ÉMISSIONS ANTHROPIQUES DE CO₂ DÉPENDENT DE... 1H30

Réalisez l'expérience sur la combustion présentée dans la séance A6 du manuel « Changement climatique et terres émergées », ou reportez-vous y.



La quantité de CO₂ émise par la combustion $m_{CO_2 combustion}$ dépend de la masse des différents combustibles effectivement brûlés :

$$m_{CO_2 combustion} = f(m_{charbon brûlé}, m_{pétrole brûlé}, m_{bois brûlé}, m_{gaz brûlé}, \dots)$$

LES MOUVEMENTS DES FLUIDES DÉPENDENT DE... 1H30

Réalisez l'expérience sur les courants océaniques présentée dans la séance C5 du manuel « Océan et cryosphère », ou reportez-vous y.

La vitesse de déplacement d'un volume donné de fluide (gaz ou liquide) V_{fluide} dépend de :



- la différence entre la température du fluide et la température environnante (ΔT)
- la différence entre la salinité du fluide et la salinité du milieu environnant (ΔS)
- le relief local H_{relief}
- etc.

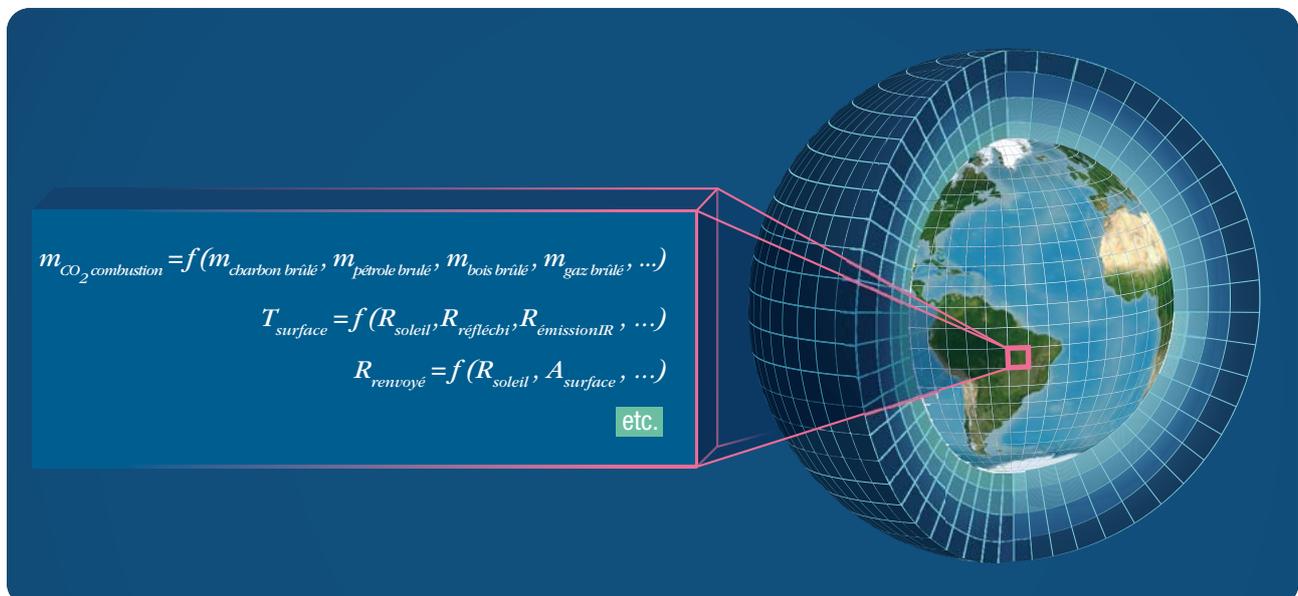
$$V_{fluide} = f(\Delta T, \Delta S, H_{relief}, \dots)$$

CONCLUSION 5 MIN

Le but de cette activité était de montrer que les scientifiques ont besoin d'établir toutes les relations de dépendance entre différentes quantités physiques. Ces interdépendances peuvent se traduire par un ensemble d'équations impliquant toutes ces quantités physiques, également appelées variables. **Relier toutes ces variables par le biais de formules** est le principe même de la **modélisation climatique**, comme peut le résumer le schéma de conclusion ci-dessous. Ce schéma indique que les scientifiques découpent la surface de la Terre et l'atmosphère en mailles. Dans chacune de ses mailles, des lois physiques permettent de comprendre et modéliser le climat.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

Pour prolonger ou approfondir les notions de capacité d'absorption ou d'émission du rayonnement infrarouge par certains gaz, vous pouvez utiliser l'animation « Effet de serre » avec vos élèves. Dans la partie 3 : « Petit tour en laboratoire », les élèves disposent d'éléments empiriques, convaincants et accessibles.



Le principe de la modélisation climatique : un ensemble de variables physiques liées entre elles par des lois physiques (des équations).



DOCUMENT 1. QUE VOIENT NOS YEUX ?

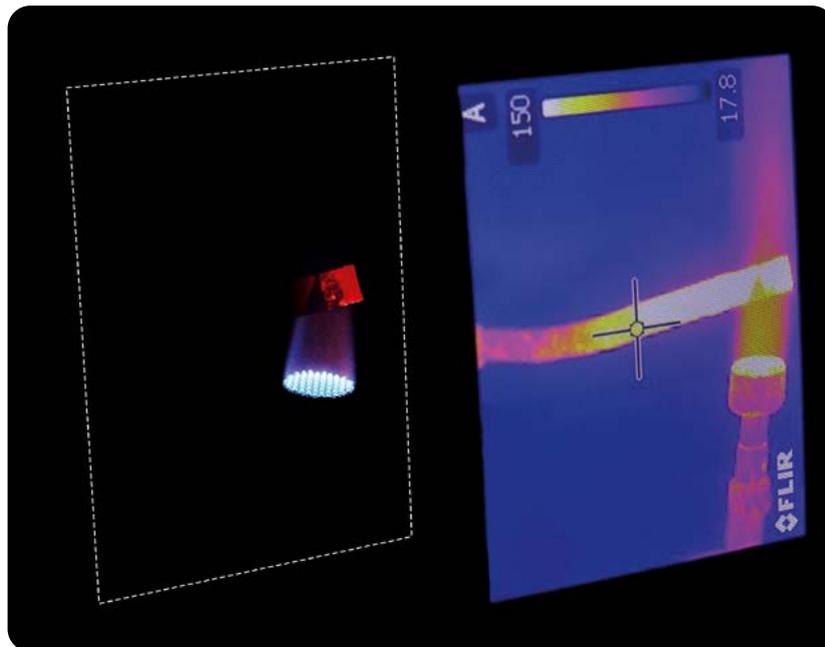
Question 1. Que voyez-vous sur ces photos ?

Question 2. Comment expliquez-vous les couleurs ?



DOCUMENT 2. QUE VOIT CETTE CAMÉRA SPÉCIALE ?

Question 3. Que voit cette caméra spéciale ?



À gauche : une barre de cuivre est chauffée, dans l'obscurité, jusqu'à ce qu'elle devienne incandescente. À droite : la même scène vue par une « caméra thermique ».



DOCUMENT 3. QUE PEUT-ON S'ATTENDRE À VOIR À L'ÉCRAN ?

Question 4. Que peut-on s'attendre à voir à l'écran ?



DOCUMENT 4. QUE MONTRE RÉELLEMENT LA CAMÉRA SPÉCIALE ?

Question 5. Que montre réellement la caméra spéciale ?



FICHE 2.3



DOCUMENT 5. QUE PEUT-ON DIRE DU RAYONNEMENT INFRAROUGE DE CES TASSES ?

Question 6. Que peut-on dire du rayonnement infrarouge de ces tasses ?



← Forte puissance du rayonnement IR

← Faible puissance du rayonnement IR

Échelle de puissance du rayonnement IR

La même scène, captée par une caméra infrarouge.

Une tasse d'eau chaude et une tasse d'eau froide.



DOCUMENT 6. QUE VOIT CETTE CAMÉRA SPÉCIALE ?

Question 7. Quelle est le degré de transparence de ces matériaux ?



Vitre en verre



Vitre en verre



Fiche plastique et tasse remplie d'eau



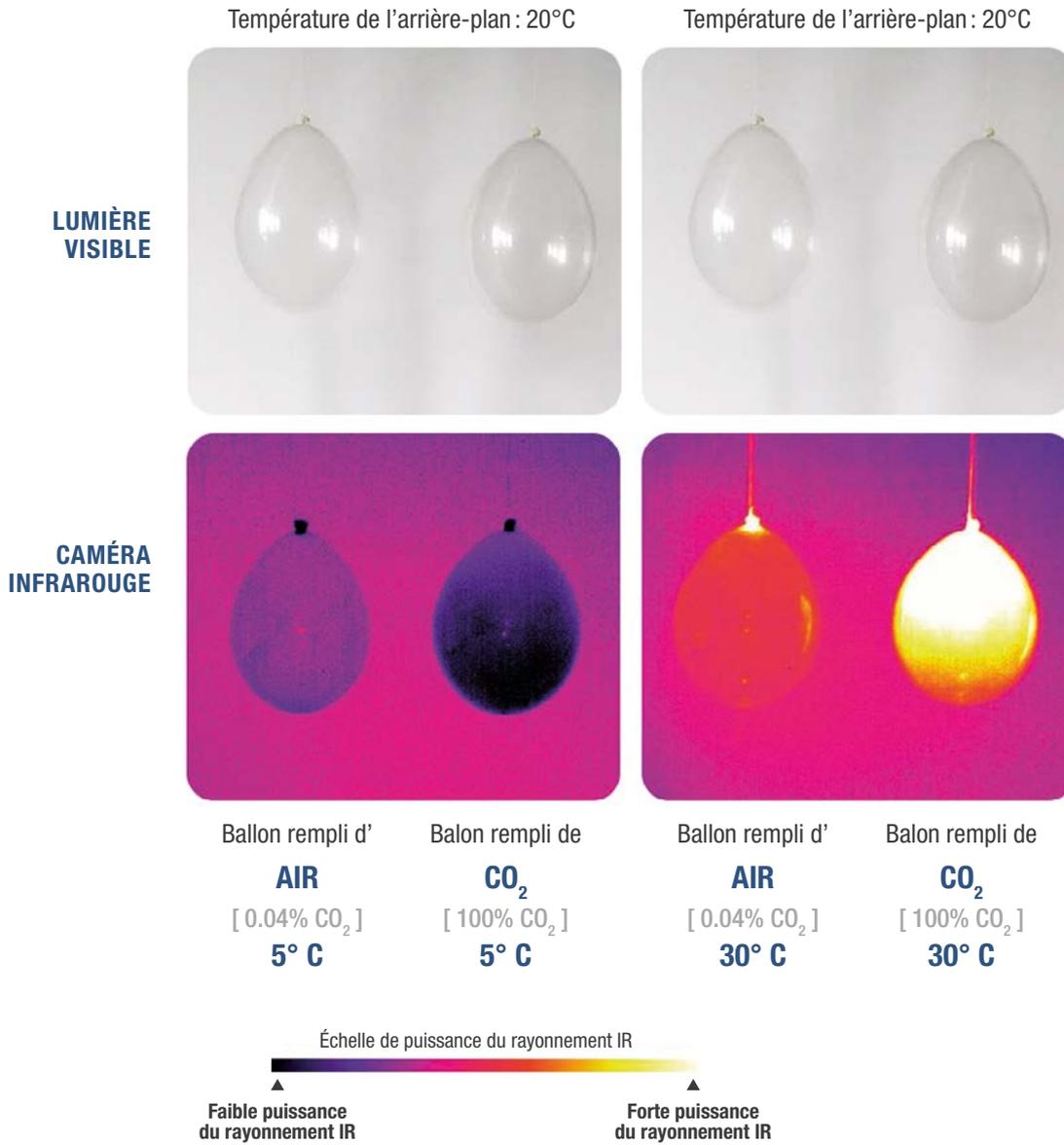
DOCUMENT 7. EXPÉRIENCE SUR LA TRANSPARENCE ET LE RAYONNEMENT DES GAZ

Question 8. Les gaz peuvent-ils émettre un rayonnement visible ?

Question 9. Les gaz peuvent-ils émettre un rayonnement infrarouge ?

Question 10. Les gaz laissent-ils passer le rayonnement visible ?

Question 11. Les gaz laissent-ils passer le rayonnement infrarouge ?





DOCUMENT 8. CONSTRUIRE UN « ÉQUILIBRE RADIATIF »

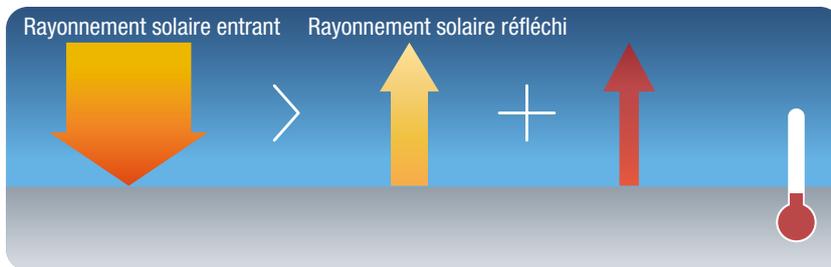
Question 12. Qu'arrivera-t-il au rayonnement infrarouge émis par la Terre s'il y a plus de « CO₂ froid » dans l'atmosphère terrestre ?
(indice : utilisez la FICHE 2.4 – QUESTION 11)

Question 13. Quel est le seul moyen pour que le système « planète Terre » retrouve son équilibre radiatif ?

Considérons un objet (en gris), placé à l'extérieur dans le vide (en bleu).



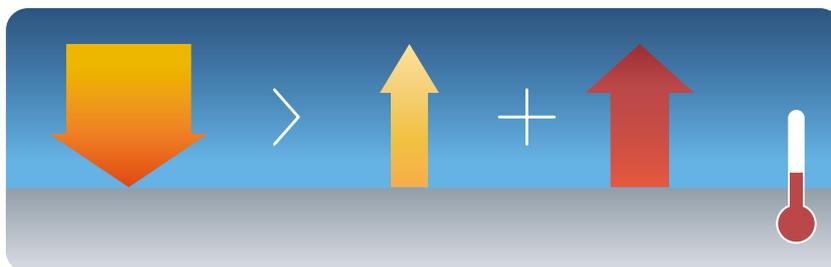
Comme nous l'avons vu dans la FICHE 2.1, le rayonnement d'un objet dépend de sa température. Si celle-ci est inférieure à 700 °C, ce rayonnement se situe uniquement dans le domaine infrarouge.



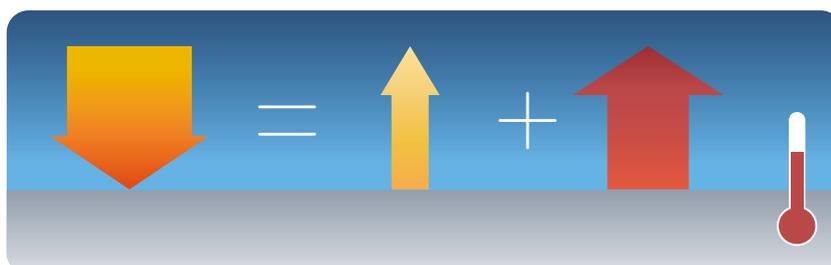
Si le soleil éclaire notre objet (flèche jaune vers le bas), une partie de ce rayonnement entrant peut être réfléchi, l'autre partie étant absorbée par le matériau.



Il s'agit d'une situation de déséquilibre, car la somme des énergies sortantes est inférieure à l'énergie entrante : la température de l'objet augmente.



Comme nous l'avons vu dans la FICHE 2.3 – DOCUMENT 5, plus le corps est chaud, plus son rayonnement IR est puissant. Ainsi, l'émission de rayonnement infrarouge de notre objet augmente.



La température de l'objet augmente jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. C'est ce qu'on appelle « l'équilibre radiatif ». C'est le même processus qui est en jeu dans le système « planète Terre ».



DOCUMENT 9. QU'EST-CE QUI ACCÉLÈRE L'ÉVAPORATION DE L'EAU ?

Question 14. Regardez les images. Quels sont les paramètres physiques qui accélèrent l'évaporation ?



DISCIPLINES CONCERNÉES
Physique-Chimie
SVT
Géographie

DURÉE
Préparation : 1h
Activité : 1h

TRANCHE D'ÂGE
Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE
Jeu sérieux (jeu de plateau)

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Après avoir identifié les principaux facteurs influençant le climat à une échelle régionale (séances 1 et 2), les élèves étudient et comprennent les liens entre ces différents facteurs qui, ensemble, forment le système climatique de la Terre. Ils s'aperçoivent que différents milieux interagissent les uns avec les autres, puisqu'ils sont soumis à l'influence des mêmes variables (par exemple, la température ou l'humidité). La modification des variables peut engendrer des boucles de rétroaction positives ou négatives au sein du système climatique.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 2 – S'ouvrir à la complexité dans la durabilité
Compétence 2.1 – Pensée systémique



CONCEPTS ABORDÉS

Effet de serre, cycle de l'eau, cycle du carbone, albédo, modèle, climat non perturbé, climat perturbé, interactions, rétroaction, niveau de confiance, incertitude, consensus.

PRÉPARATION 1H

MISE EN PLACE DU JEU DE PLATEAU

- Jeu de plateau : Imprimez la **FICHE 3.1** au format A2 (format poster) : un exemplaire par groupe de 6 élèves. Si possible, plastifiez-le.
- Éléments à placer sur le plateau de jeu : Imprimez la **FICHE 3.2** (deux pages) et découpez les différentes pièces (éléments et flux) pour chaque groupe. Mettez-les dans une enveloppe pour faciliter leur réutilisation ultérieure.
- Nous vous suggérons d'utiliser de la pâte adhésive pour fixer les différents éléments sur le plateau.
- Imprimez un exemplaire de la **FICHE 3.3** (cinq pages) pour chaque groupe. Vous pouvez choisir de conserver la feuille entière, ou de découper les cartes pour en faire un petit livret (en découpant suivant les pointillés, puis en superposant les différentes cartes ou en les agrafant les unes aux autres).

Vous pouvez imprimer les éléments de correction de votre choix (**FICHE 3.5**, 3 pages) afin que les élèves aient, par exemple, un schéma récapitulatif à retenir après la leçon.



LE JEU

- Le jeu comprend cinq milieux distincts. Au début, le climat n'est **pas perturbé par les activités humaines**, et les cinq milieux sont vides. L'objectif du **premier tour** est de reconstituer les milieux et les processus qui s'y déroulent en suivant les instructions sur les cartes et en plaçant les différents éléments sur le plateau (parfois, ce sont les mêmes variables : température, humidité, altitude, etc.). Les élèves construisent ainsi un modèle.
- Au **deuxième tour**, le climat est désormais **modifié par les activités humaines** et les élèves doivent changer les milieux en conséquence. Ils utilisent un modèle pour réaliser une expérience. À la fin de ce tour, les élèves expliquent à leurs camarades de groupe la conclusion à laquelle ils ont abouti.
- Le **troisième tour** est destiné aux élèves les plus avancés [**EXPERTS**]. Il porte sur les concepts de « rétroaction climatique » et de « niveau de consensus d'une affirmation scientifique ».

INTRODUCTION 5 MIN

Demandez aux élèves de rappeler la différence entre **climat** et **météo**.

Puis, montrez-leur la vidéo CLIM «Le Système climatique de la Terre», dans laquelle Fiona O'Connor (MET Office Science, Royaume-Uni) rappelle que de nombreux paramètres sont pris en compte dans l'étude de l'atmosphère : concentrations de gaz à effet de serre, température, précipitations, albédo, etc. (voir séance 1).



VISIONNER LA VIDÉO ➔

- ◀ Deux joueurs au 3^e tour. Eva lit son livret et suit les instructions. Elle relie deux milieux à l'aide de flèches de rétroaction positive (amplification du changement climatique) et explique ses choix à Simon. Pour chaque flèche, elle choisit la bonne couleur en fonction du niveau de consensus scientifique.

Chaque paramètre dépend de plusieurs autres. Les paramètres (ou variables) sont liés par les lois de la physique et de la chimie (voir séance 2) :

$$R_{\text{émissionIR}} = f(T_{\text{surface}}, T_{\text{air}}, H, m_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{CH}_4}, \dots)$$

Demandez aux élèves de se pencher sur les mêmes milieux que dans la séance 1 (FICHE 1.1). *Pour chaque milieu, le climat est-il régi par des processus internes à ce milieu ? Quels sont les liens entre les différents milieux ? Quels processus touchent l'ensemble de notre planète ?* Pour répondre à ces questions, les élèves utilisent un modèle climatique, ici via un jeu de plateau.

DÉROULEMENT 45 MIN

1. Six élèves partagent un plateau de jeu. Il y a un maître du jeu et cinq scientifiques (correspondant aux cinq livrets, FICHE 3.3).
2. Les élèves lisent les règles du jeu (FICHE 3.4) et commencent à jouer les premier et deuxième tours. Le troisième tour est conçu pour les étudiants plus avancés [EXPERTS].
3. Pour le troisième tour, notez la présence de petites indications sur les cartes affichant le niveau de consensus des climatologues vis-à-vis des différentes rétroactions (consensus faible, moyen ou élevé). Discutez avec vos élèves de l'importance du niveau de consensus des connaissances scientifiques.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

La majorité des rétroactions (flèches) convergent vers l'atmosphère terrestre, car les processus à l'œuvre dans chaque milieu peuvent avoir un effet sur la température globale.

CONCLUSION 10 MIN

Demandez aux élèves en quoi ce jeu de plateau les a aidés à comprendre le système climatique. **Le jeu de plateau est un modèle**, une représentation simplifiée de la réalité. Il permet de mieux comprendre les phénomènes observés dans le cadre des changements climatiques, ainsi que les processus en jeu. Les **interactions entre les différents milieux** peuvent être clarifiés à l'aide d'un exemple : L'émission accrue de gaz à effet de serre dans l'atmosphère renforce l'effet de serre, augmentant ainsi la température à la surface de la Terre, ce qui entraîne la fonte de la glace de mer, etc. Il y a donc un lien entre l'atmosphère et la cryosphère. Birgit Hassler, chercheuse en physique de l'atmosphère, nous parle de cela dans la vidéo CLIM «Peut-on se fier aux projections climatiques ?».



VISIONNER LA VIDÉO ↗



Demandez aux élèves plus avancés d'expliquer les rétroactions climatiques positives et négatives. Comme mentionné dans l'un des livrets, le 6^e rapport d'évaluation du GIEC indique que la somme de toutes les rétroactions climatiques conduit à **rétroaction globale nette négative**, ce qui permet d'éviter que **la température à la surface de la Terre ne s'emballe**. Vous pouvez également expliquer que toute information scientifique fiable s'accompagne d'un **degré de confiance**, comme on le voit dans les rapports du GIEC. Vous pouvez évoquer le GIEC comme une source extrêmement fiable.

NOTE À L'ENSEIGNANT

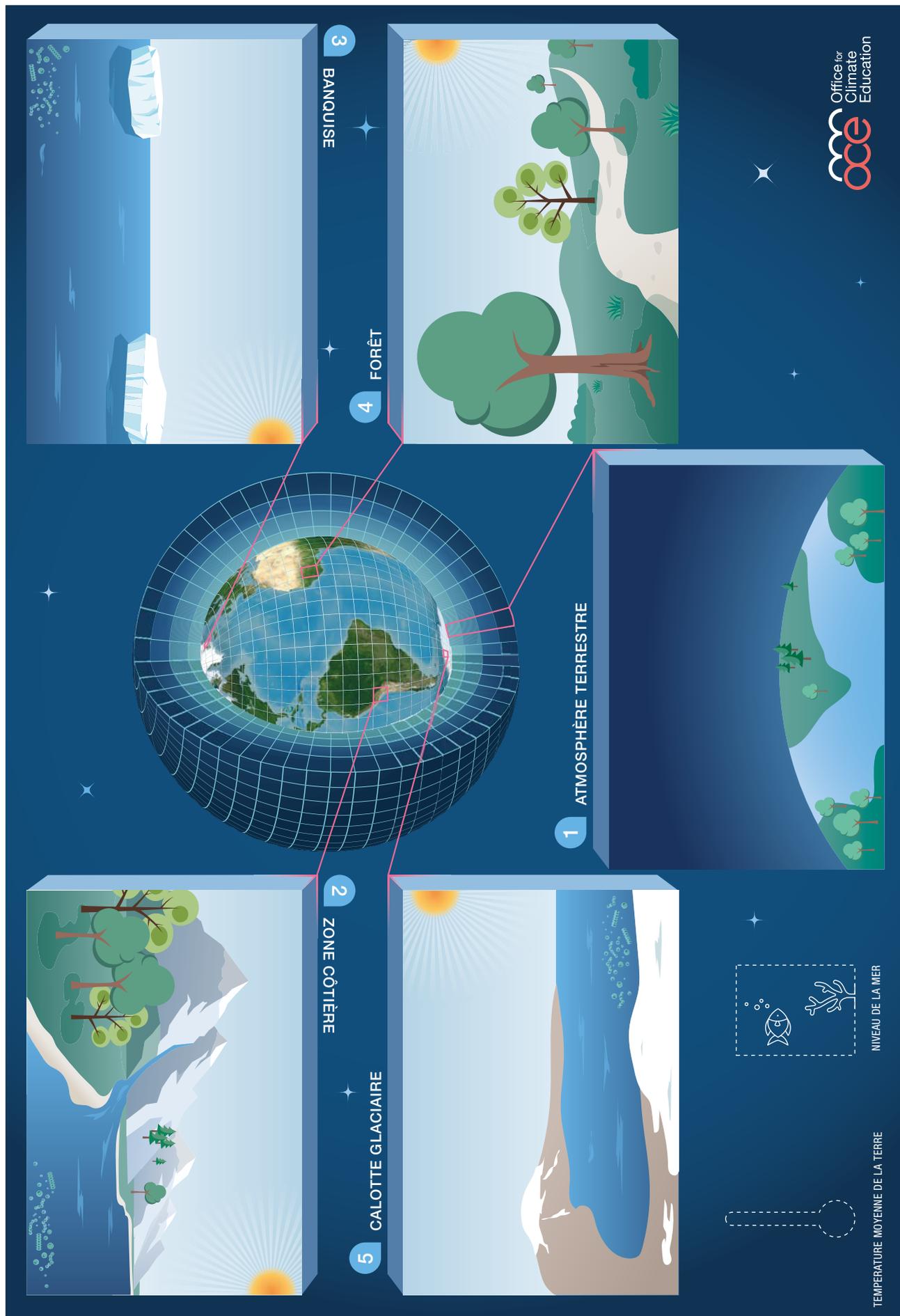
LE CONSENSUS DE LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

Le GIEC évalue et compile les informations scientifiques les plus récentes sur les changements climatiques, reflétant le consensus de la communauté scientifique reposant sur des preuves vérifiables et valables selon les connaissances et outils actuels. Un consensus découle de données convergentes et s'établit progressivement avec un degré de confiance élevé (accords scientifiques, solidité des preuves, etc.). Par exemple, il existe un large consensus parmi les climatologues sur l'origine anthropique des changements climatiques actuels.



Un consensus scientifique **n'exclut pas** :

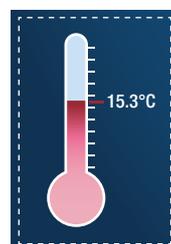
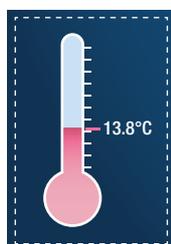
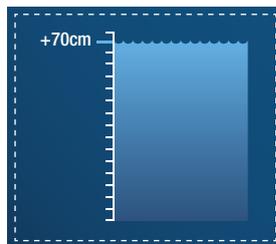
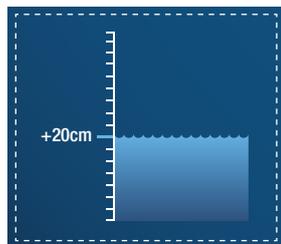
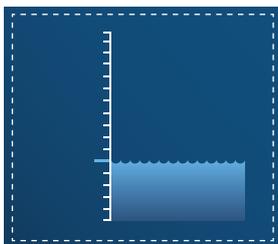
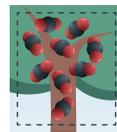
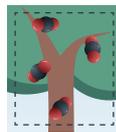
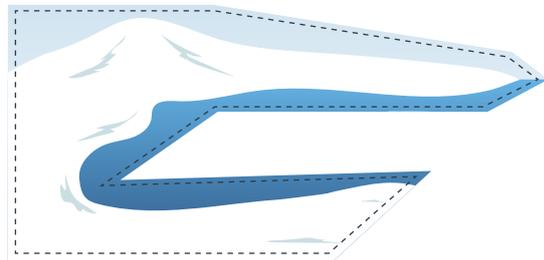
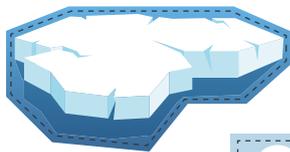
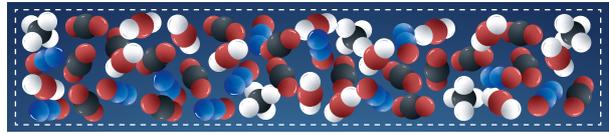
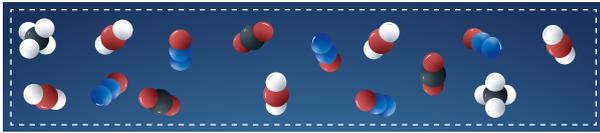
- ~ Des désaccords sur certains aspects d'un sujet donné. Par exemple, si il y a consensus sur l'origine anthropique du changement climatique actuel, les scientifiques discutent encore de l'amplitude de l'augmentation de la température liée à un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ (entre 2,5 et 4,5 °C).
- ~ La notion d'incertitude, inhérente aux données scientifiques, notamment sur l'ampleur des changements climatiques futurs (projections). Cette incertitude dépend :
 - des rétroactions climatiques (impliquant les nuages, l'absorption de carbone, l'absorption de chaleur par les océans, les glaces, etc.)
 - des émissions humaines futures (politiques climatiques, nouvelles technologies, comportements des individus, etc.).



FICHE 3.2 PIÈCES



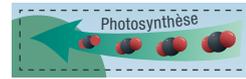
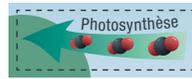
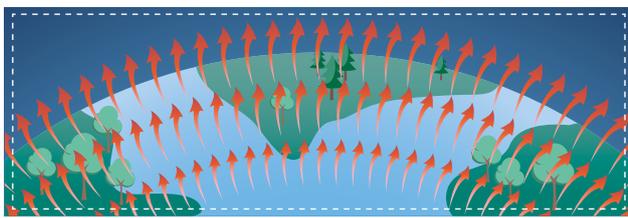
Découpez les éléments du jeu de plateau.



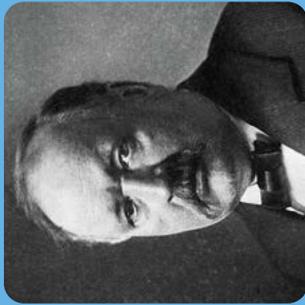
FICHE 3.2 PIÈCES



Découpez les flux du jeu de plateau.



Chaque flèche de rétroaction peut être utilisée **plusieurs fois**.



1 Svante Arrhenius (1859 – 1927)
Il a poursuivi les travaux de précédents.e.s scientifiques sur le lien entre l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et l'augmentation de la température à la surface de la Terre. Il est à l'origine de l'expression «effet de serre».

PAGE 1



**1 VOUS ÊTES
PHYSIENS
DE L'ATMOSPHÈRE**

PAGE 2

**PREMIER TOUR
CRIER UN MODÈLE**

Modéliser l'effet de serre

La surface de la Terre **émet un rayonnement infrarouge** qui transporte de la «chaleur» à l'atmosphère. L'atmosphère terrestre contient naturellement un mélange de **gaz à effet de serre** qui piègent une partie de ce rayonnement émis. Cela empêche la **totalité de ce rayonnement de s'échapper dans l'espace**. C'est pour cela que les températures à la surface de la Terre sont plutôt douces, permettant à la vie de se développer.

Ajoutez 1 élément
Ajoutez 2 flux

Question 1
Quelle est la principale conséquence de l'effet de serre ?

PAGE 3

PREMIER TOUR

— **Réponse** —
La température à la surface de la Terre augmente.

Discussion entre les cinq scientifiques
Quelle serait la température à la surface de la Terre sans effet de serre ?

PAGE 4

**DEUXIÈME TOUR
UTILISER LE MODÈLE POUR MENER
UNE EXPÉRIENCE**

Que simule le modèle ?

Augmentez la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère pour reproduire l'augmentation des émissions d'origine humaine.

Moins de rayonnement **infrarouge s'échappe de l'atmosphère** vers l'espace. Cela entraîne une augmentation de la température à la surface de la Terre. Depuis la révolution industrielle, la surface de la Terre s'est réchauffée de près de 1,2 °C.

— **Modifiez 1 élément**
Modifiez 1 flux —

Question 2: Quel est le niveau actuel de réchauffement de la planète (c.-à-d. l'augmentation de la température moyenne par rapport à la température préindustrielle) ?

PAGE 5

**TROISIÈME TOUR
COMPRENDRE LES INTERACTIONS
ENTRE LES MILIEUX**

Rétroactions climatiques

Le réchauffement de la planète entraîne une évaporation accrue de l'eau, ce qui augmente la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, elle contribue au réchauffement de la planète. Il s'agit d'une forte rétroaction positive.

— **Reliez au moins deux milieux**
par une flèche rouge (amplification) ou violette (atténuation)



PAGE 7

TROISIÈME TOUR

Rétroactions climatiques

Tous les corps émettent un rayonnement thermique. L'intensité du rayonnement augmente avec la température du corps. De la même manière, plus la Terre se réchauffe, plus elle émet de rayonnement vers l'espace. Cela entraîne une baisse de la température de surface et atténue donc le réchauffement de la planète.



PAGE 8

DEUXIÈME TOUR

— **Réponse** —

Le niveau actuel de réchauffement de la planète est de +1,2 °C par rapport au niveau préindustriel.

PAGE 6



PAGE 1



2 Emma Haziza, née en 1977, est hydrologue. Elle est experte en gestion des risques naturels, en particulier ceux liés à l'eau douce. Cela fait d'elle une experte de l'adaptation aux changements climatiques.

PAGE 2



2 VOUS ÊTES HYDROLOGUE

Vous étudiez actuellement les zones côtières, un environnement très spécifique.

PAGE 3

**PREMIER TOUR
CRIER UN MODÈLE**

Modéliser le cycle de l'eau

L'eau liquide à la surface de la Terre (océans, lacs, etc.) s'évapore dans l'atmosphère (par **évaporation** et **évapotranspiration**). La **vapeur d'eau** dans l'atmosphère est déplacée par les **vents**. Elle se condense et forme de petites gouttelettes qui constituent les **nuages**. Les gouttelettes dans les nuages grossissent et deviennent de la **pluie**. Cette eau liquide retourne à la surface de la Terre et s'écoule finalement dans les lacs, les rivières et les océans. C'est le cycle de l'eau.

Ajoutez 4 éléments
Ajoutez 2 flux

Question 1 : Citez quelques phénomènes météorologiques qui accompagnent la pluie.

PAGE 4

PREMIER TOUR

Réponse
Cyclones tropicaux, moussons, orages, cyclones des latitudes moyennes.

Discussion entre les cinq scientifiques
Où ces événements sont-ils les plus susceptibles de se produire sur Terre ?

PAGE 5

**DEUXIÈME TOUR
UTILISER LE MODÈLE POUR MENER UNE EXPÉRIENCE**

Augmentez la température à la surface de la Terre pour reproduire le réchauffement climatique.

Que simule le modèle ?

Il simule une intensification du cycle de l'eau, avec **davantage d'évaporation** et **davantage de pluie** dans certaines régions.

Modifiez 1 élément
Ajoutez 1 flux

Question 2
Certaines régions pourraient connaître à la fois plus de sécheresses et plus d'inondations. Vrai ou faux ?

PAGE 6

DEUXIÈME TOUR

Réponse
C'est vrai ! Avec le changement climatique, les régimes de précipitations changent dans l'espace et dans le temps.
Par exemple, certaines régions comme la Californie peuvent connaître de graves sécheresses en été, mais des pluies torrentielles et des inondations en automne. D'une manière générale, les événements extrêmes sont plus intenses et plus fréquents en raison du changement climatique.

PAGE 7

**TROISIÈME TOUR
COMPRENDRE LES INTERACTIONS ENTRE LES MILIEUX**

Rétroactions climatiques

Près de la moitié des modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations dans la zone du Sahel en Afrique. Un reverdissement du Sahel impliquerait plus d'activité de photosynthèse, donc plus de captation de CO₂ par les plantes. Le CO₂ étant un gaz à effet de serre, cela atténuerait les changements climatiques : il s'agit d'une rétroaction climatique négative.

Reliez au moins 2 milieux par une flèche rouge (amplification) ou violette (atténuation)

Moyen Niveau de consensus scientifique

PAGE 8

TROISIÈME TOUR

Rétroactions climatiques

Le réchauffement climatique modifie le cycle de l'eau en changeant, par exemple, la taille et la nature des nuages. Les modèles indiquent qu'aux basses latitudes (en dessous de 60°), les nuages élevés seront encore plus élevés, amplifiant l'effet de serre, tandis que les nuages bas seront moins nombreux, impliquant une diminution de l'albédo et une augmentation de la température de la surface terrestre. Ces deux processus combinés semblent augmenter la température de la surface terrestre. C'est une rétroaction climatique positive.

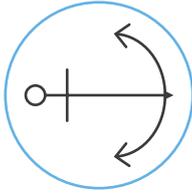
Reliez au moins 2 milieux par une flèche rouge (amplification) ou violette (atténuation)

Moyen Niveau de consensus scientifique



3 Marie Tharp (1920 - 2006) est une géologue et océanographe états-unienne. Elle est célèbre pour ses travaux de cartographie océanographique.

PAGE 1



3 VOUS ÊTES OcéANOGRAPHE

Vous étudiez actuellement la banquise sur l'océan, un milieu très spécifique.

PAGE 2

**PREMIER TOUR
CRÉER UN MODÈLE**

Modéliser l'albédo

Dans l'Arctique, l'air et l'eau de mer sont si froids que la **banquise** (ou glace de mer) se forme à la surface de l'océan. La majeure partie du **rayonnement solaire qui atteint la banquise** est **réfléchi vers l'espace** car la glace est blanche – elle a un albédo élevé. Lorsque la banquise fond, elle laisse place à l'océan sombre, qui absorbe une grande partie du rayonnement solaire.

Ajoutez 1 élément
Ajoutez 2 flux

Question 1
Quel rôle joue la banquise dans le système climatique ?

PAGE 3

PREMIER TOUR

Réponse

La banquise ayant un albédo élevé, elle réfléchit la majeure partie du rayonnement solaire entrant. Cela permet à la surface de la Terre de rester fraîche.

Discussion entre les cinq scientifiques
En l'absence de banquise arctique, la température de la Terre serait-elle plus élevée ou plus basse qu'aujourd'hui ?

PAGE 4

**DEUXIÈME TOUR
UTILISER LE MODÈLE POUR MENER
UNE EXPÉRIENCE**

Augmentez la température à la surface de la Terre pour reproduire le réchauffement climatique.

Que simule le modèle ?

Le modèle simule la fonte de la banquise, ce qui suppose un albédo plus faible (moins de rayonnement solaire réfléchi par la surface de la Terre).

Supprimez 1 élément
Supprimez 1 flux

Question 2
La fonte de la banquise peut-elle amplifier le réchauffement déclenché dans le modèle ?

PAGE 5

**TROISIÈME TOUR
COMPRENDRE LES INTERACTIONS
ENTRE LES MILIEUX**

Rétroactions climatiques

Lorsque la banquise fond, l'albédo de la Terre diminue et, par conséquent, moins de rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace. Cela signifie que la surface de la Terre absorbe davantage de rayonnement et se réchauffe. Cela favorise d'autant plus la fonte de la banquise, accentuant le réchauffement de la planète. C'est l'amplification polaire. Il s'agit d'une rétroaction climatique positive.

Reliez au moins 2 milieux par une flèche rouge (amplification) ou violette (atténuation)

Élevé Niveau de consensus scientifique

PAGE 7

TROISIÈME TOUR

Rétroactions climatiques

Les auteurs du 6^e rapport d'évaluation du GIEC (AR6) ont estimé la somme de toutes les rétroactions climatiques : rétroactions dues aux nuages, à la vapeur d'eau, à l'albédo, au rayonnement thermique, etc. Les scientifiques ont conclu – avec un niveau de confiance moyen – que la somme de toutes ces rétroactions donne une rétroaction climatique négative. Cela permettrait d'éviter que la température à la surface de la Terre ne devienne incontrôlable.

Moyen Niveau de consensus scientifique

PAGE 8

DEUXIÈME TOUR

Réponse

Oui, une banquise réduite signifie qu'il y a moins de rayonnement solaire réfléchi. L'excès de rayonnement solaire est absorbé par l'océan, qui se réchauffe, favorisant d'autant plus la fonte de la banquise, etc. Il s'agit d'une boucle de rétroaction positive.

PAGE 6





4 Agnes Arber (1879 - 1960) était une botaniste et philosophe britannique. Elle travaillait à une époque où les femmes n'étaient pas autorisées à exercer dans les mêmes laboratoires que les hommes.

PAGE 1



4 VOUS ÊTES BOTANISTE

Vous étudiez actuellement les forêts tropicales, un milieu très spécifique.

PAGE 2

**PREMIER TOUR
CRÉER UN MODÈLE**

Modéliser le cycle du carbone

Les plantes réalisent la **photosynthèse** : elles absorbent le **dioxyde de carbone** de l'atmosphère pour produire de la matière organique. Lorsque les plantes respirent (ce qu'elles font jour et nuit), elles rejettent une partie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (**respiration**). Le reste est stocké sous forme de carbone dans les racines, le tronc et les feuilles, ainsi que dans le sol. Les forêts tropicales indigènes, telles que la forêt amazonienne, sont d'importants puits de carbone.

Ajoutez 2 éléments
Ajoutez 2 flux

Question 1 : Où va le carbone lorsque les plantes meurent ?

PAGE 3

PREMIER TOUR

Réponse

Il est rejeté dans l'atmosphère à travers la décomposition (respiration) ou en raison des feux de forêt (défrichage).

Discussion entre les cinq scientifiques

Quels sont les facteurs qui contribuent à la mortalité des arbres, et donc à la libération de carbone ?

PAGE 4

**DEUXIÈME TOUR
UTILISER LE MODÈLE POUR MENER
UNE EXPÉRIENCE**

Augmentez la température à la surface de la Terre pour reproduire le réchauffement climatique.

Que simule le modèle ?

Dans certaines régions, comme l'Amazonie, le modèle simule des sécheresses plus fréquentes qui nuisent à la croissance des arbres. L'activité de **photosynthèse** (et de **respiration**) étant réduite, **moins de carbone est stocké** dans la forêt.

Modifiez 1 élément
Modifiez 2 flux

Question 2 : Une température de surface plus élevée augmente-t-elle ou diminue-t-elle l'efficacité du puits de carbone forestier ?

PAGE 5

DEUXIÈME TOUR

Réponse

Dans certaines régions, comme l'Amazonie, l'efficacité du puits de carbone forestier diminue avec le réchauffement climatique.

PAGE 6

**TROISIÈME TOUR
COMPRENDRE LES INTERACTIONS
ENTRE LES MILIEUX**

Rétroactions climatiques

Les projections indiquent une modification des régimes de précipitations, qui deviennent par exemple plus fréquentes et abondantes dans les forêts russes et canadiennes. Associé à des températures plus élevées, ce phénomène entraîne une croissance de la couverture végétale. Une végétation accrue permet de capter plus de CO₂. Celui-ci étant un gaz à effet de serre, cela atténue les changements climatiques. Il s'agit d'une **rétroaction climatique négative**.

Relevez au moins 2 milieux
par une flèche rouge (amplification)
ou violette (atténuation)

Moyen

Niveau de consensus scientifique

PAGE 7

TROISIÈME TOUR

Rétroactions climatiques

Le phytoplancton est un producteur primaire : lorsqu'il est exposé à la lumière, il absorbe le CO₂ par le biais de la photosynthèse, ce qui fait de lui un puits de carbone. Certaines études montrent que son activité est affaiblie par l'augmentation de la température des océans et les perturbations des courants océaniques dues aux changements climatiques. Le puits de carbone que constitue le phytoplancton diminue, provoquant des concentrations de CO₂ plus élevées dans l'atmosphère et une intensification de l'effet de serre. C'est une **rétroaction climatique positive**.

Moyen

Niveau de consensus scientifique

PAGE 8

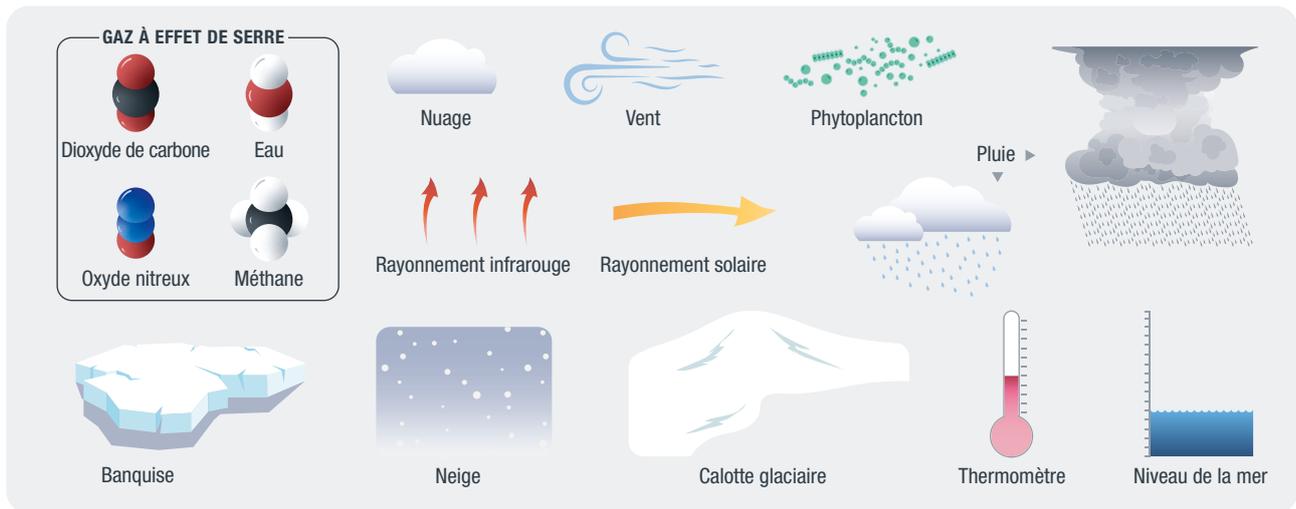


MISE EN PLACE ET DÉROULEMENT DU JEU

MISE EN PLACE DU JEU : LE MAÎTRE DU JEU

- Règle le thermomètre sur +12,6 °C (la température moyenne sur Terre à l'époque pré-industrielle).
- Place le niveau de la mer au plus bas (niveau pré-industriel).
- Lis les instructions sur le livret pour placer les différents éléments sur le tableau.

QUELQUES LÉGENDES DE PIÈCES



PREMIER TOUR : CRÉER UN MODÈLE

- Le maître du jeu veille à ce que les scientifiques suivent rigoureusement chaque étape du jeu.
- À tour de rôle, les cinq scientifiques se présentent et lisent les instructions à haute voix.
- Ce tour porte sur le « climat non perturbé » : le climat avant la période industrielle.
- Les cinq scientifiques travaillent ensemble pour construire les différents milieux en suivant les instructions sur les livrets et pour répondre aux questions.

Une fois les cinq modèles constitués, il est temps d'ajouter ou de supprimer des « éléments » et/ou des « flux » en fonction des instructions sur les cartes.

DEUXIÈME TOUR : UTILISER LE MODÈLE POUR MENER UNE EXPÉRIENCE

- Ce deuxième tour représente un monde au « climat perturbé » par les changements climatiques.
- Le maître du jeu règle le thermomètre sur la température moyenne actuelle de la surface de la Terre (+13,8 °C).
- Il place le niveau de la mer à +20 cm (niveau actuel par rapport au niveau pré-industriel).
- À tour de rôle, les cinq scientifiques lisent à haute voix les instructions du deuxième tour. Ensemble, ils modifient les différents milieux en fonction (ajout ou suppression d'éléments, etc.) et répondent aux questions.
- Là encore, le maître du jeu veille à ce que les scientifiques suivent rigoureusement chaque étape du jeu.

TROISIÈME TOUR : COMPRENDRE LES INTERACTIONS ENTRE LES MILIEUX
pour les étudiants plus avancés

- Le troisième tour représente un monde au « climat perturbé » par les changements climatiques en 2100.
- Le maître du jeu règle le thermomètre à +15,3 °C (avec les politiques actuelles, le réchauffement de la planète devrait atteindre +2,7 °C en 2100, par rapport à l'ère préindustrielle).
- Les scientifiques lisent les cartes à haute voix et à tour de rôle, et suivent les instructions. La plupart du temps, ils doivent relier les milieux entre eux par des flèches de « rétroaction ». Pour chaque flèche, ils choisissent la couleur correspondant au niveau de consensus scientifique (couleurs claires pour un niveau moyen, foncées pour un niveau élevé).
- À la fin de son tour, chaque scientifique explique les rétroactions représentées.
- Chaque flèche de rétroaction peut être utilisée plusieurs fois.



PREMIER TOUR : CRÉER UN MODÈLE (climat non perturbé)

DEUXIÈME TOUR : UTILISER LE MODÈLE POUR MENER UNE EXPÉRIENCE (climat perturbé : changement climatique)

TROISIÈME TOUR : COMPRENDRE LES INTERACTIONS ENTRE LES MILIEUX (climat perturbé, mais avec prise en compte de la rétroaction climatique : atténuation ou amplification du changement climatique)

1 SVANTE ARRHENIUS

PHYSICIEN ET CHIMISTE – EXPERTISE : L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE

PREMIER TOUR

Ajoutez un élément : une petite quantité de gaz à effet de serre.

Ajoutez deux flux : Rayonnement IR de la surface de la Terre vers l'atmosphère + Rayonnement IR de l'atmosphère vers l'espace.

Discussion entre les cinq scientifiques: Quelle serait la température à la surface de la Terre sans effet de serre ?

Réponse : Sans effet de serre, moins de rayonnement IR est réémis vers la surface de la Terre (= plus de rayonnement IR s'échappe directement vers l'espace). La température à la surface de la Terre serait donc plus basse (-18 °C).

DEUXIÈME TOUR

Modifiez un élément : la petite quantité de gaz à effet de serre est remplacée par une grande quantité de gaz à effet de serre.

Modifiez un flux : le flux important de rayonnement IR qui s'échappe dans l'espace est remplacé par un petit flux de rayonnement IR qui s'échappe dans l'espace (la plus grande quantité de gaz à effet de serre piège davantage de rayonnement IR).

TROISIÈME TOUR

Exemple de rétroaction positive

Augmentation de l'évaporation de l'eau → augmentation de la vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère → renforcement de l'effet de serre → réchauffement de la planète.

Placez une flèche d'amplification allant du milieu 2 au milieu 1.

Exemple de rétroaction négative

Également appelée « rétroaction de Planck », elle est puissante et le degré de confiance la concernant est élevé. Il n'y a pas lieu de relier deux milieux ici, car il s'agit d'une rétroaction globale.

2 EMMA HAZIZA

HYDROLOGUE – EXPERTISE : LES ZONES CÔTIÈRES

PREMIER TOUR

Ajoutez quatre éléments : vapeur d'eau, vent, nuage et nuage de pluie.

Ajoutez deux flux : l'évaporation et l'évapotranspiration.

Discussion entre les cinq scientifiques: Où ces événements sont-ils le plus susceptibles de se produire sur Terre ?

Réponse : Dans les zones tropicales (où il y a davantage d'évaporation et d'évapotranspiration).

DEUXIÈME TOUR

Modifiez un élément: le nuage de pluie est remplacé par un gros nuage de pluie.

Ajoutez un flux : l'évaporation.

TROISIÈME TOUR

Exemple de rétroaction négative

Le niveau de photosynthèse dans la région du Sahel est modifié. Placez une flèche d'atténuation allant du milieu 4 au milieu 1.

Exemple de rétroaction positive

Il y a davantage de nuages en raison d'une intensification du cycle de l'eau. Placez une flèche d'amplification allant du milieu 2 vers le milieu 1.



3 MARIE THARP

GÉOLOGUE ET CARTOGAPHE OCÉANIQUE – EXPERTISE : LA BANQUISE

PREMIER TOUR

Ajoutez un élément : la banquise.
Ajouter deux flux : le rayonnement solaire entrant et le rayonnement solaire réfléchi.

Discussion entre les cinq scientifiques :
 En l'absence de banquise arctique, la température de la Terre serait-elle plus élevée ou plus basse qu'aujourd'hui ?

Réponse : Sans banquise, l'océan absorberait davantage de rayonnement et la température à la surface de la Terre augmenterait.

DEUXIÈME TOUR

Supprimez un élément : la banquise.
Supprimez un flux : le rayonnement solaire réfléchi.

TROISIÈME TOUR

Exemple de rétroaction positive
 Fonte de la banquise → diminution de l'albédo → réchauffement de l'océan → fonte accrue de la banquise → augmentation de la température à la surface de la Terre. Placer une flèche d'amplification allant du milieu 3 au milieu 1.

Exemple de rétroaction négative
 La somme de toutes les rétroactions est une rétroaction climatique négative. Cela évite que la température à la surface de la Terre s'emballé. Il n'y a pas lieu de relier deux milieux ici, car il s'agit d'une rétroaction globale.

4 AGNES ARBER

BOTANISTE – EXPERTISE : LA FORÊT

PREMIER TOUR

Ajoutez deux éléments : du CO₂ dans l'atmosphère, une quantité importante de CO₂ stockée dans les plantes.

Ajouter deux flux : forte photosynthèse, forte respiration.

Discussion entre les cinq scientifiques :
 Quels sont les facteurs qui contribuent à la mortalité des arbres, et donc à la libération de carbone dans l'atmosphère ?

Réponse : Tout ce qui entrave la croissance des plantes (sécheresses, parasites) ou détruit les forêts (incendies, déforestation) augmente la quantité de CO₂ dans l'atmosphère.

DEUXIÈME TOUR

Modifiez un élément : seule une petite quantité de CO₂ est stockée dans les plantes.

Modifiez deux flux : remplacez la forte photosynthèse par une photosynthèse faible, et la respiration forte par une respiration faible.

TROISIÈME TOUR

Exemple de rétroaction négative
 En Russie et au Canada, la couverture végétale augmente (degré de confiance moyen) → la végétation supplémentaire absorbe davantage de CO₂ de l'atmosphère. Placer une flèche d'atténuation allant du milieu 4 vers le milieu 1.

Exemple de rétroaction positive
 Moins de phytoplancton dans l'océan → activité photosynthétique réduite → absorption réduite de CO₂ par l'océan → augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique → réchauffement climatique. Placez une flèche d'amplification allant du milieu 2 ou 3 vers le milieu 1 (de l'océan vers l'atmosphère).

5 LOUIS AGASSIZ

BIOLOGISTE ET GÉOLOGUE – EXPERTISE : LES CALOTTES GLACIAIRES

PREMIER TOUR

Ajoutez deux éléments : la calotte glaciaire et les chutes de neige.

Discussion entre les cinq scientifiques :
 Citez d'autres endroits sur Terre (à part l'Antarctique) où l'on trouve de la glace continentale.

Réponse : Le Groenland et l'Antarctique sont les **calottes glaciaires** continentales de la Terre. On trouve aussi de la glace continentale dans les glaciers de montagne.

DEUXIÈME TOUR

Supprimez un élément : la calotte glaciaire.

Ajoutez deux éléments : l'élévation du niveau des mers et des océans, qui pourrait atteindre 70 cm d'ici à 2100.

TROISIÈME TOUR

Exemple de rétroaction positive
 Fonte de la glace continentale (degré de confiance élevé) → élévation du niveau de la mer. Placez une flèche d'amplification allant du milieu 5 vers le milieu 3 ou 2 (de la calotte glaciaire à l'océan).

Exemple de rétroaction négative
 Mégafeux (degré de confiance moyen) → les particules de fumée font barrage au rayonnement solaire incident. Placez une flèche d'atténuation allant de l'atmosphère vers la terre.



CORRIGÉ : PREMIER TOUR

The diagram illustrates the Earth's climate system with a central globe and five numbered components:

- 1 ATMOSPHÈRE TERRESTRE:** Shows a cross-section of the atmosphere with red arrows indicating heat rising from the surface and being reflected back down by greenhouse gas molecules (represented by red, white, and blue spheres).
- 2 ZONE CÔTIÈRE:** Shows a coastal area with a river, trees, and a beach. Arrows indicate evaporation from the water and transpiration from the trees, and condensation/precipitation over the land.
- 3 BANQUISE:** Shows a frozen body of water with ice. An arrow indicates heat being lost from the water to the atmosphere, and another arrow shows heat being conducted through the ice to the water below.
- 4 FORÊT:** Shows a forest with a tree. Arrows indicate photosynthesis (taking in CO2) and respiration (releasing CO2).
- 5 CALOTTE GLACIAIRE:** Shows a glacier. A thermometer indicates a temperature of 12.6°C and a scale shows the sea level.

At the bottom left, a thermometer shows a temperature of 12.6°C and a scale shows the sea level. At the bottom right, the logo for OCE (Office for Climate Education) is visible.

CORRIGÉ : DEUXIÈME TOUR

The diagram illustrates the Earth's climate system with a central globe and five numbered components, similar to the first tour but with updated values:

- 1 ATMOSPHÈRE TERRESTRE:** Shows a cross-section of the atmosphere with red arrows indicating heat rising from the surface and being reflected back down by greenhouse gas molecules (represented by red, white, and blue spheres).
- 2 ZONE CÔTIÈRE:** Shows a coastal area with a river, trees, and a beach. Arrows indicate evaporation from the water and transpiration from the trees, and condensation/precipitation over the land.
- 3 BANQUISE:** Shows a frozen body of water with ice. An arrow indicates heat being lost from the water to the atmosphere, and another arrow shows heat being conducted through the ice to the water below.
- 4 FORÊT:** Shows a forest with a tree. Arrows indicate photosynthesis (taking in CO2) and respiration (releasing CO2).
- 5 CALOTTE GLACIAIRE:** Shows a glacier. A thermometer indicates a temperature of 13.8°C and a scale shows the sea level rising by +20cm.

At the bottom left, a thermometer shows a temperature of 13.8°C and a scale shows the sea level rising by +20cm. At the bottom right, the logo for OCE (Office for Climate Education) is visible.

SÉANCE 4 DES MODÈLES POUR REPRÉSENTER LA RÉALITÉ

DISCIPLINES CONCERNÉES

Physique
Mathématiques
Informatique

DURÉE

Préparation : 10 min
Activité : 1h (Curieux)
1h30 (Expert)

TRANCHE D'ÂGE

Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

Analyse documentaire
Programmation (Python)
Modélisation analogique
et numérique

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves comprennent que les modèles sont des représentations simplifiées de la réalité. Ce sont des outils qui permettent de comprendre et de prédire le climat. Leur utilisation présente de nombreux avantages, mais aussi des limites, car les modèles ne reflètent pas toute la complexité de la réalité. À l'aide d'un modèle physique (une maquette ou une analogie), les élèves comprennent les différences entre le monde réel/physique et le monde numérique.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 3 – Envisager des avenir durables
Compétence – 3.3 Pensée exploratoire



CONCEPTS ABORDÉS

Modèle, donnée d'entrée, donnée de sortie, échantillonnage

PRÉPARATION 10 MIN

- 2 thermomètres, 2 lampes (ou lumière du soleil), 1 récipient en verre.
- [EXPERTS UNIQUEMENT]: ordinateur avec le fichier `greenhouse.ipynb` à portée de main, **FICHE 4.1** (pour chaque binôme).



INTRODUCTION 20 MIN

Montrez quelques images (ou modèles réduits) à la classe. Par exemple, un dinosaure en plastique, une maquette du cycle de l'eau, une carte de prévision météorologique, la position GPS du lycée, etc. *Quel est leur point commun ?* Guidez les élèves vers le mot « modèle ».

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

La navigation GPS utilise un modèle heuristique. Il calcule une bonne façon d'aller d'un point A à un point B, mais pas nécessairement la meilleure (voir le manuel '123code' pour plus de détails).

Qu'est-ce qu'un modèle ? Plus précisément, à quoi sert-il ? Plusieurs réponses possibles :

FACILITER UNE OBSERVATION

- ~ Modèle d'une représentation d'un être vivant (dinosaur, fleur, etc.)
- ~ Modèle d'échelle (système solaire, plaques lithosphériques)
- ~ Regroupement d'informations dans un diagramme (organigramme, graphique, diagramme circulaire)
- ~ Modèle de laboratoire (drosophile en biologie, porc en chirurgie)
- ~ Analyse statistique (sondage, probabilités)

PRÉSENTER CLAIREMENT

- ~ Ontologie (web sémantique)
- ~ Modèle de données (nomenclature XML)
- ~ Modèle théorique (lois de l'hérédité de Mendel)
- ~ Modèle conceptuel (paradoxe des jumeaux d'Einstein)
- ~ Schéma (cycle de l'eau)

APPLIQUER UNE THÉORIE POUR FAIRE DES PRÉVISIONS

- ~ Modèle mathématique (croissance démographique malthusienne, comportement du consommateur)
- ~ Modèle heuristique (GPS)
- ~ Modèle informatique (prévisions météorologiques, simulateur de vol, réseau neuronal)



Modèle de reconstruction de la couleur du plumage de l'*Oviraptoridae Caudipteryx*, un dinosaure.

Collectivement, la classe aboutit sur une **définition d'un « modèle »** : il s'agit d'une représentation simplifiée de la réalité qui peut aider à comprendre des problèmes complexes. *Un jeu de plateau peut-il être un modèle ?*

En discutant du jeu fait à la séance 3, les élèves constateront que cette analogie est bien un modèle. Les différentes composantes de ce modèle se répartissent en trois catégories :

DONNÉES D'ENTRÉE

~ IR, albédo, température, rayonnement solaire, concentration des gaz à effet de serre, évaporation, vent, respiration, photosynthèse, eau (atmosphère, glace de mer et glace continentale, pluie/neige), CO₂ (biosphère, atmosphère, lithosphère).
~ Facultatif : pergélisol, nuages, feux.

DONNÉES DE SORTIE

~ Émissions infrarouges sortantes, température, pluie/neige, taux d'évaporation, élévation du niveau de la mer
~ Mise à jour de toutes les valeurs des données d'entrée

ÉCHANTILLONNAGE

~ 5 cellules (1 atmosphère, 1 Antarctique, 1 région arctique, 1 forêt, 1 hydrosphère)

La catégorie « échantillonnage » peut faire l'objet d'une autre discussion sur les limites des modèles. À l'évidence, ce modèle ne peut pas être utilisé pour les prévisions météorologiques, ni même pour les projections climatiques régionales. Par exemple, une cellule (forêt) peut représenter soit la forêt amazonienne, soit une forêt sibérienne : il est impossible de représenter toute la complexité et la diversité des forêts avec un modèle aussi simple.

DÉROULEMENT 30 MIN (CURIEUX) À 1H (EXPERT)

Nous pouvons désormais poser la question suivante : *Une expérience physique peut-elle être un modèle ?* Les élèves réalisent l'expérience classique de l'effet de serre : ils comparent la température à l'intérieur et à l'extérieur d'une serre (plus de détails dans le manuel in [Ocean & Cryosphere, Lesson B1](#)).



Discutez de l'expérience en soi :

Les élèves ont compris que l'augmentation de température observée dans l'expérience n'est pas due à l'effet de serre. Il s'agit plutôt d'un effet de confinement, l'air plus chaud étant piégé dans la serre. Des expériences similaires peuvent être menées en remplaçant le récipient en verre par un récipient en plastique, ou l'air par du CO₂ pur : dans tous les cas, la température augmente, mais pas à cause des gaz à effet de serre.

Les élèves comprennent le raisonnement de Svante Arrhenius, le chimiste suédois à l'origine de l'expression « effet de serre », c'est une analogie. Malgré ses limites, cette expérience est basée sur l'utilisation d'un modèle, comme on peut le constater en remplissant le tableau suivant :

DONNÉES D'ENTRÉE

~ Matériau du récipient
~ Composition de l'air

DONNÉES DE SORTIE

~ Température

ÉCHANTILLONNAGE

~ 2 cellules (1 cellule de contrôle, 1 cellule d'essai)

ACTIVITÉ SUPPLÉMENTAIRE EXPERTS UNIQUEMENT, 30 MIN

L'enseignant distribue la **FICHE 4.1**. Les élèves effectuent une activité de codage simple : ils utilisent et modifient, sur ordinateur, un modèle numérique Python/Jupyter de l'effet de serre. Si nécessaire, ayez la **FICHE 2.5** à portée de main.

Les élèves répondent aux questions du document Python :

1. Pourquoi les variables ASR_obs et OLR_obs sont-elles presque égales ? Comme nous l'avons vu dans la **FICHE 2.5**, l'équilibre est atteint lorsque le flux solaire entrant est égal au flux sortant total (visible + IR). Dans la figure ci-dessous (**FICHE 4.1**), la puissance du rayonnement solaire incident est de 340 W/m², et la puissance du rayonnement solaire sortant (OLR pour *outgoing longwave radiation*, rayonnement sortant à grande longueur d'onde, ou infrarouge) est de (100+240) W/m².

2. Comparer les deux transmissivités (c.-à-d. la façon dont les radiations sont transmises) : les élèves doivent garder $\tau_{1} = 0,61$ (l'effet de serre observé), mais ils peuvent choisir toute autre valeur inférieure à 0,61 pour τ_{2} . Plus τ_{2} décroît, plus la température augmente, plus l'équilibre met du temps à être atteint.

Les élèves doivent décrire clairement les composantes du modèle. τ_{2} peut représenter l'efficacité de l'effet de serre (une petite valeur traduit un effet de serre important). Chaque variable représente un paramètre, une interaction ou une entité physique. Deux lois de la physique (vues dans la [séance 2](#)) sont mises en œuvre de manière très simplifiée :

$$T_{\text{surface}} = f(R_{\text{soleil}}, R_{\text{réfléchi}}, R_{\text{émission IR}}, \dots)$$

$$R_{\text{émission IR}} = f(T_{\text{surface}}, T_{\text{air}}, H, m_{\text{CO}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{CH}_4}, \dots)$$

Conclure que ce modèle numérique/mathématique peut être utilisé comme **outil de prédiction** (si τ est donné, il est possible de prédire la valeur de la température de surface).

CONCLUSION 10 MIN

La classe peut maintenant comparer les différents modèles qu'elle a étudiés. Utilisez un tableau comme celui ci-dessous (laissez les élèves définir les lignes comme ils l'entendent) pour analyser le degré de fidélité de la représentation de la réalité (par exemple, pour représenter le soleil : une lampe est utilisée dans un cas, la puissance du rayonnement solaire incident dans un autre).

Dans tous les cas, les élèves ont observé que les modèles peuvent être utilisés pour reproduire le monde réel, soit pour faciliter une observation (par exemple, le modèle de dinosaure), soit à des fins d'analyse et de prévision (les prévisions météorologiques). L'exemple de « l'expérience classique de l'effet de serre » sert d'avertissement : **un modèle ne doit jamais être surinterprété, sous peine d'en tirer des conclusions erronées.** Dans la prochaine séance, les élèves en apprendront davantage sur les modèles numériques.



Expérience de l'effet de serre (modèle analogique) en classe.

ASPECT	JEU DE PLATEAU (MODÈLE ANALOGIQUE)	EXPÉRIENCE DE L'EFFET DE SERRE (MODÈLE ANALOGIQUE)	PROGRAMMATION DE L'ÉQUILIBRE RADIATIF (MODÈLE NUMÉRIQUE)
Rayonnement solaire	Flèches	Lampe ou Soleil	1 360 W/m ² (constante solaire)
Gaz à effet de serre	Flux de CO ₂	Récipient solide	Variable « transmissivité atmosphérique » τ
Dimensions	5 cellules	1 test, 1 contrôle	Rayon constant de l'atmosphère terrestre supposant une isotropie sphérique
etc.



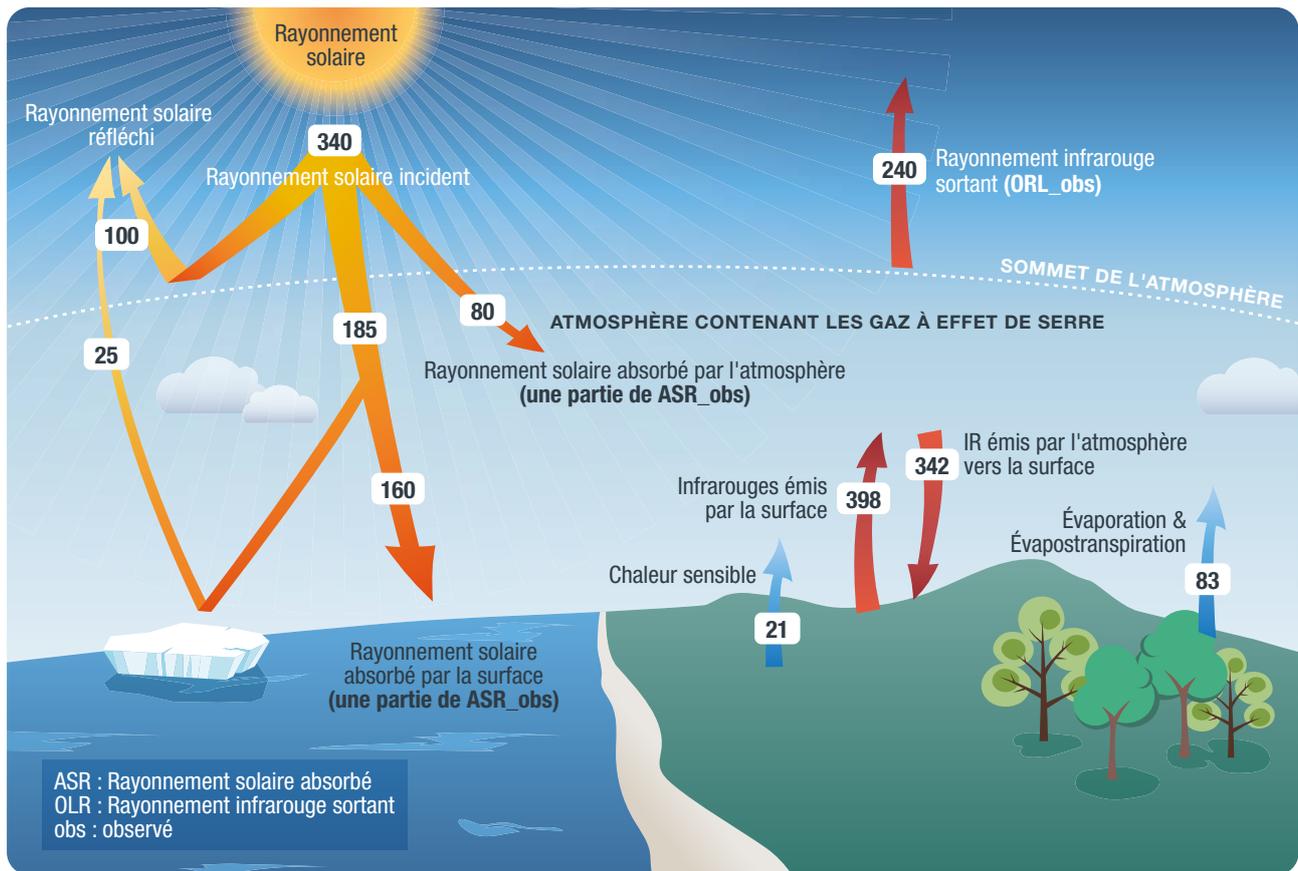
UTILISATION DE PYTHON ET DE JUPYTER NOTEBOOK

Ouvrez *Jupyter Notebook* dans votre navigateur web : <https://jupyter.org> > try > **Jupyter Notebook**.
 (Lien direct : <https://jupyter.org/try-jupyter/notebooks/?path=notebooks/Intro.ipynb>) Note : l'interface est en anglais.

Jupyter Notebook est une interface qui peut prendre en charge deux types de « cellules » : des blocs de texte au format *Markdown*, qui peuvent être mis en forme comme dans un éditeur de texte classique, et des blocs de Code qui exécutent des lignes de code Python. Sur cette toute première page, on voit une cellule *Markdown* intitulée « Introduction », une cellule Code indexée « [1]: » avec la syntaxe Python en couleur, puis une cellule graphique automatiquement générée par cette cellule Code, et enfin une deuxième cellule *Markdown* proposant d'autres démos.

En naviguant sur la page et en cliquant sur les différentes cellules, le menu déroulant en haut de page indique le type de cellule sélectionné (markdown, code, raw). Lorsque vous sélectionnez une cellule Code, vous pouvez utiliser la commande Run, ou « exécuter » (4e bouton en partant de la gauche) : cela compilera et exécutera le code Python de la première cellule à la cellule actuellement sélectionnée.

Pour charger le cahier (notebook), cliquez sur le logo « Jupyterlite ». La page <https://jupyter.org/try-jupyter/tree/> s'ouvrira et affichera la liste de tous les fichiers disponibles. Localisez le fichier « **greenhouse.ipynb** ». Si vous ne le trouvez pas, vous pouvez le télécharger manuellement à partir de votre disque dur. Double-cliquez ensuite sur le nom du fichier pour l'ouvrir. Maintenant, suivez le Notebook, penchez-vous sur le code et répondez aux questions qui s'affichent. La figure suivante pourra vous être utile :



Représentation schématique du bilan énergétique moyen global de la Terre. Les chiffres indiquent les meilleures estimations des composantes du bilan énergétique moyenné à l'échelle mondiale en W/m^2 , représentant les conditions climatiques au début du 21^e siècle.

Sources : 2023, Ministère de la Transition Énergétique. Adapté de : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/pdf/chiffres-cles-du-climat-2023.pdf>, page 19.

SÉANCE 5 LES MODÈLES CLIMATIQUES ÉVOLUENT

DISCIPLINES
CONCERNÉES

Physique
Histoire des sciences
Mathématiques
Informatique

DURÉE

Préparation : 15 min
Activité : 2h

TRANCHE D'ÂGE

Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

Analyse documentaire

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves apprennent que les modèles climatiques évoluent au fil du temps et gagnent en précision, grâce aux améliorations techniques et à l'intégration de nouveaux paramètres.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 2 – S'ouvrir à la complexité en matière de durabilité
Compétence – 2.3 Cadrage des problèmes



CONCEPTS ABORDÉS

GIEC, Modèles climatiques, prévisions météorologiques, projections climatiques

PRÉPARATION 15 MIN

- Imprimez la **FICHE 5.1** (une par élève).
- Prévoyez des ordinateurs ou tablettes pour des groupes de 4 à 6 élèves.
- Vidéos :

L'évolution des jeux vidéo



VISIONNER LA VIDÉO ↗

Utilisez une capture d'écran ou bien la **FICHE 5.1**.

« Qu'est-ce qu'un modèle climatique ? » Vidéo CLIM, par Roland Séférian, climatologue au CNRM, Météo-France/ CNRS, France.



VISIONNER LA VIDÉO ↗

« Peut-on se fier aux projections climatiques ? » Vidéo CLIM, par Birgit Hassler, chercheuse au DLR Oberpfaffenhofen, Allemagne.



VISIONNER LA VIDÉO ↗

 **CONSEIL À L'ENSEIGNANT**

Cette activité est basée sur une comparaison entre des jeux d'ordinateur simulant un match de football et des modèles climatiques simulant le climat. Vous pouvez choisir d'introduire cette activité par un vrai match de football avec vos élèves !

INTRODUCTION 15 MIN

Commencez par une discussion sur les jeux vidéo et l'informatique en général. Demandez aux élèves ce qu'ils savent sur les jeux vidéo : *quand ont-ils été inventés et comment ont-ils évolué ?*

D'une certaine manière, un modèle climatique s'apparente à un jeu vidéo. Dans l'activité suivante, nous les comparerons en analysant l'évolution des jeux vidéo.

DÉROULEMENT 1H30

Répartissez les élèves en groupes de 4 à 6.

PARTIE 1 : LES JEUX VIDÉO, DES MODÈLES DU MONDE RÉEL 45 MIN

- Regardez la vidéo « L'évolution des jeux vidéo » et discutez-en. Cette vidéo peut être considérée comme un modèle de match de foot, créé par ordinateur (matériel et logiciel informatiques).
- Rappelez aux élèves la définition d'un modèle.
- *Ce jeu vidéo est-il une bonne reproduction d'un match de foot ?*
 - ~ Énumérer les aspects qui ressemblent au foot réel ;
 - ~ Énumérez les éléments qui manquent par rapport à un vrai match ;
 - ~ D'après vous, ce modèle offre-t-il une expérience de football virtuel agréable pour l'utilisateur du jeu vidéo ?
- *Diriez-vous que le fait de jouer à un jeu de foot virtuel contribue à améliorer les compétences de foot dans la vie réelle ? Pourquoi ?*

Regardez à nouveau la vidéo, portant votre attention sur l'évolution des jeux. Chaque groupe en discute :

- *Décrivez l'évolution des jeux vidéo de foot. Dresser la liste de tous les changements.*
- *Comparez le premier et le dernier jeu vidéo : Auquel préféreriez-vous jouer, et pourquoi ?*
- *Pourquoi les anciens jeux vidéo sont-ils moins réalistes que les nouveaux ?*

Prenez maintenant la **FICHE 5.1**. Reposez aux élèves les mêmes questions, et ajouter les suivantes si vous le désirez :

- *Nommez les composantes d'un modèle climatique.*
- *Comment les climatologues parviennent-ils à représenter différents éléments du système climatique ?*

- Comment les modèles climatiques ont-ils évolué au fil du temps ? Citez deux types de changement.
- Comment les scientifiques intègrent-ils l'activité humaine dans leurs modèles ?

Discussion en classe et conclusion intermédiaire :

Discutez des réponses de chaque groupe en classe. Les jeux vidéo sont des **modèles qui représentent le monde réel dans un environnement virtuel**. Les développeurs de jeux intègrent des éléments d'un vrai jeu de foot dans le logiciel afin de produire un « bon » modèle de jeu de foot. **«Bon» signifie que le modèle représente correctement la réalité et, dans le cas du jeu vidéo, que le joueur vit une expérience agréable.**

Au cours des dernières décennies, les jeux vidéo ont évolué parallèlement à la technologie informatique, intégrant de nouveaux détails (par exemple, des spectateurs, des commentateurs) qui simulent mieux la réalité. Toutefois, si les jeux modernes sont plus réalistes et plus agréables à jouer, **ils ne pourront jamais reproduire toute la complexité de la réalité** d'un match de foot (vision large de tout le public, émotions, contexte, etc.).

PARTIE 2 : MODÈLES CLIMATIQUES 45 MIN

Divisez chaque groupe en deux sous-groupes de 2 à 3 élèves. Chaque sous-groupe regarde l'une des deux vidéos CLIM et propose une série de quatre questions pour faire un quiz sur le contenu de la vidéo. Puis ils échangent, regardent l'autre vidéo et répondent au quiz. Si nécessaire, donnez les exemples suivants :

Quiz pour la vidéo «Qu'est-ce qu'un modèle climatique?»

1. Citez les composantes d'un modèle climatique.
2. Qu'y a-t-il derrière ce code informatique ?
3. Comment les climatologues représentent-ils les différents éléments du système climatique ?
4. Comment les modèles climatiques ont-ils évolué au fil du temps ? Citez deux types de changements.

Quiz pour la vidéo «Peut-on se fier aux projections climatiques?»

5. Quelles sont les différences entre les prévisions météorologiques diffusées à la télévision et les projections climatiques ?
6. Comment déterminer la précision d'un modèle ?
7. Donnez un exemple d'incertitude difficile à intégrer dans un modèle climatique.
8. Qu'utilisent les scientifiques pour prendre en compte l'activité humaine dans les modèles ?

Discussion en classe et conclusion intermédiaire :

Demandez aux groupes de discuter de leurs réponses avec l'ensemble de la classe. Ensuite, entamez une nouvelle discussion :

Dans quelle mesure peut-on dire qu'un jeu vidéo et un modèle climatique sont similaires ?

Pour élaborer un modèle climatique, les scientifiques incluent les composantes – nécessaires et suffisantes – du système terrestre dans leur programme informatique afin de reproduire correctement le climat de la Terre.

Cependant, ils sont limités par leur compréhension du système climatique et par la technologie disponible.

Quelles sont les similitudes et les différences dans l'évolution des modèles climatiques et des jeux vidéo ?

Les deux ont évolué au fil du temps, intégrant de nouveaux éléments pour reproduire le monde réel aussi fidèlement que possible. Les améliorations techniques permettent d'accroître à la fois leur résolution et leur précision.

Qu'est-ce qui constitue un « bon » modèle aux yeux des climatologues ?

Les modèles climatiques utilisent des scénarios possibles et faire des projections, ce qui n'est pas le cas d'un jeu vidéo. Pour les scientifiques, un « bon » modèle est un modèle qui reproduit correctement la réalité dans le cadre défini par certaines hypothèses. Par exemple, les modèles climatiques ne sont pas conçus pour faire des prévisions météorologiques précises, mais ils peuvent reproduire les tendances climatiques à long terme. Cette capacité à prédire constitue l'un des trois facteurs de confiance pour tout modèle numérique (comme l'explique Birgit Hassler dans la vidéo). D'autres évaluations de modèles s'intéressent à la reproduction adéquate de la variabilité du climat, ou des schémas régionaux et de leurs tendances sur une période historique donnée.

Quelles sont les limites des modèles ou des jeux vidéo dans la reproduction du monde réel ?

L'intégration d'informations plus détaillées dans le programme augmente la précision du modèle. Cependant, cela implique une augmentation du temps et de la puissance de calcul, ce qui se traduit par des coûts plus élevés. Pour les jeux vidéo, cela peut également « ralentir » le jeu et le rendre injouable sur du matériel ancien. La quantité d'informations pouvant être incluses dépend également de la technologie disponible (ex. un ordinateur doté d'une carte graphique de haute qualité).

CONCLUSION 15 MIN

Les modèles climatiques sont des modèles informatiques qui simulent des parties du monde réel (ex. le système climatique), tout comme les jeux vidéo simulent une partie du monde réel (un match de football).

Les résultats des modèles climatiques sont des projections. Toutefois, la précision et la résolution de ces projections dépendent de la qualité du modèle. Les modèles climatiques ont gagné en précision au fil du temps et continuent d'évoluer avec les progrès scientifiques et technologiques. Les modèles peuvent donc être des outils précieux qui aident les climatologues, les chercheurs, les décideurs politiques et les citoyens à prendre des décisions éclairées pour atténuer les changements climatiques.

NOTE À L'ENSEIGNANT

COMMENT COMPRENONS-NOUS LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AUJOURD'HUI PAR RAPPORT À L'ÉPOQUE DES DÉBUTS DU GIEC ?

Le premier rapport du GIEC (1990) concluait déjà que les changements climatiques d'origine anthropique seraient bientôt un fait établi, mais ce lien n'était pour l'instant que suspecté. Aujourd'hui, les preuves sont accablantes. Grâce aux nombreuses données dont nous disposons, notamment sur les climats du passé, et à des outils de modélisation de plus en plus précis, nous comprenons mieux l'interaction

de l'atmosphère avec les émissions humaines, les océans, la glace, la neige, les écosystèmes et les terres émergées. Les simulations informatiques du climat, qui se sont considérablement améliorées, incorporent de plus en plus de processus naturels et fournissent des projections particulièrement détaillées du climat futur.

POUR ALLER PLUS LOIN

Le « grand-père » des modèles climatiques actuels : <https://earthobservatory.nasa.gov/blogs/earthmatters/2015/05/21/see-one-of-the-first-climate-models/>

INFLUENCE HUMAINE SUR LE CLIMAT

1990 PREMIER RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC

! Suspectée

2021 SIXIÈME RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC

Démontrée ✓

OBSERVATIONS

Réchauffement depuis la fin du 19^e

0.3 – 0.6°C

0.95 – 1.20°C

Données sur la température de la surface terrestre

1887 stations (1861–1990)

Près de 40 000 stations (1750–2020)

Données géologiques

5 millions d'années (température)
5 millions d'années (niveau de la mer)
160 000 ans (CO₂)

65 millions d'années (température)
50 millions d'années (niveau de la mer)
450 millions d'années (CO₂)

Données satellitaires

Température, couverture neigeuse, bilan radiatif de la Terre

Température, cryosphère, bilan radiatif de la Terre, CO₂, niveau de la mer, nuages, aérosols, couverture terrestre, etc.

MODÈLES CLIMATIQUES

Résolution moyenne du modèle

500 km

100 km

25–50 km

Processus naturels représentés

Circulation de l'atmosphère et de l'océan

Circulation de l'atmosphère et de l'océan

Transfert radiatif

Transfert radiatif

Physique terrestre

Physique terrestre

Glace de mer

Glace de mer

Chimie atmosphérique

Usage des sols et couverture terrestre

Biogéochimie terrestre et marine

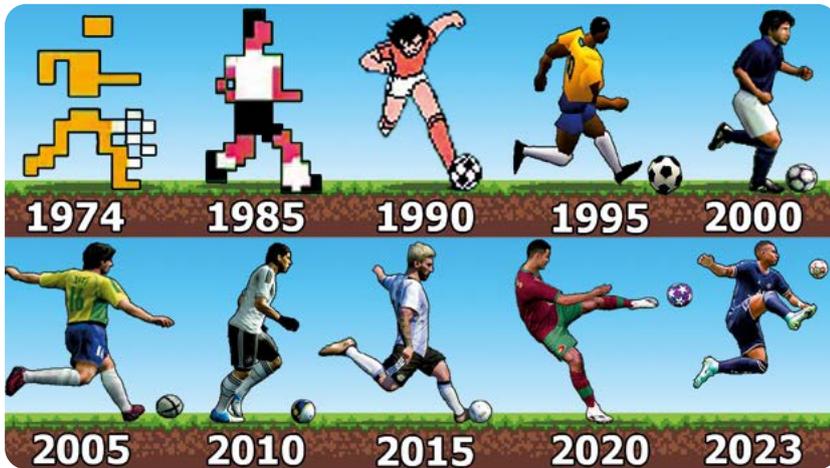
Interactions entre aérosols et nuages

Comparaison de la compréhension du climat, des observations et des modèles numériques utilisés entre le premier rapport d'évaluation (1990) et le sixième rapport d'évaluation (2021) du GIEC. Notons que cette comparaison n'est que partielle, car par souci de simplicité elle n'intègre pas de nombreux autres progrès réalisés depuis 1990 (sur la compréhension théorique, les archives géologiques et l'attribution du changement à l'activité humaine notamment).

Adapté du GIEC, AR6. Source : 2020, Frederikse et al., Rapport d'évaluation 6, Groupe de travail 1, Chapitre 1 : « Questions Fréquentes » (p. 7) (en anglais : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/faqs/IPCC_AR6_WGI_FAQ_Chapter_01.pdf)

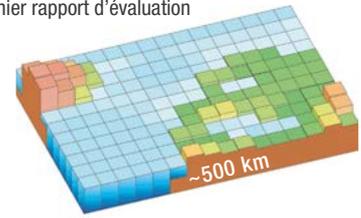


L'ÉVOLUTION DE LA REPRÉSENTATION DES AVATARS DANS LES JEUX VIDÉO AU FIL DU TEMPS



L'ÉVOLUTION DE LA RÉOLUTION DES MODÈLES CLIMATIQUES AU FIL DU TEMPS

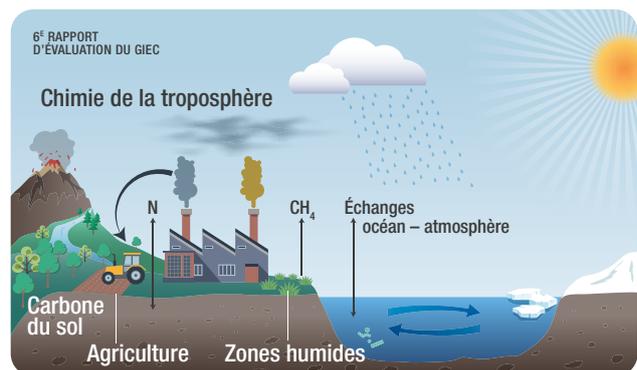
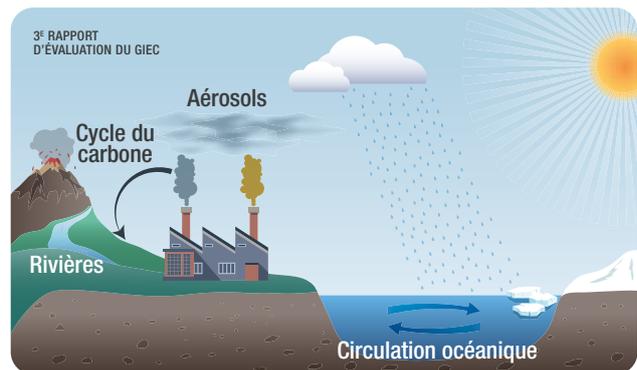
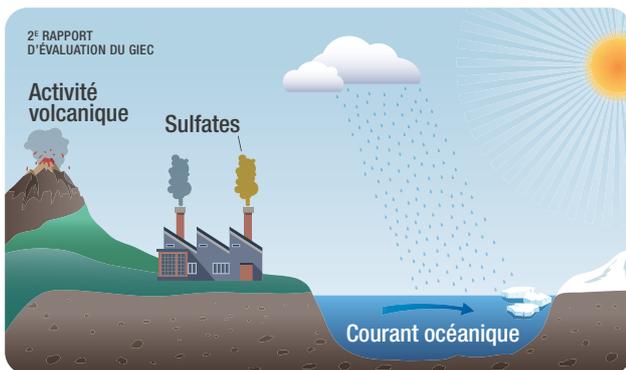
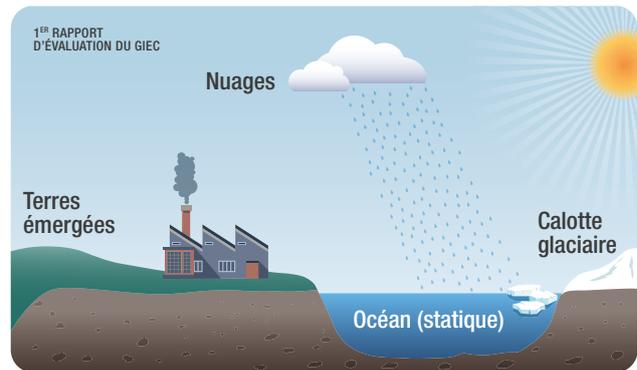
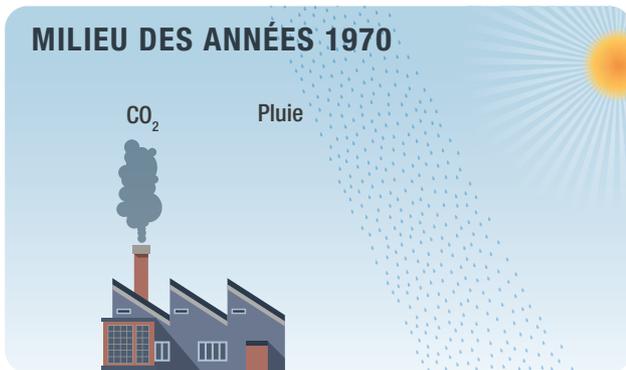
Premier rapport d'évaluation



Troisième rapport d'évaluation



L'ÉVOLUTION DE LA RÉOLUTION ET DES PARAMÈTRES PRIS EN COMPTE DANS LES MODÈLES CLIMATIQUES UTILISÉS DANS LES RAPPORTS SUCCESSIFS DU GIEC



Source : 2007, adapté des figures 1.2 et 1.4, 4^e rapport d'évaluation du GIEC, The Physical Science Basis, disponible sur le site web du GIEC (en anglais : <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>).

SÉANCE 6 VALIDATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES

DISCIPLINES CONCERNÉES
Physique

DURÉE
Préparation : 30 min
Activité : 1h30

TRANCHE D'ÂGE
Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE
Analyse documentaire
Modélisation numérique

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves découvrent comment la fiabilité des modèles climatiques numériques peut être évaluée, et ce par la reproduction d'événements présents et passés, par la prédiction d'événements futurs.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 2 – S'ouvrir à la complexité en matière de durabilité
Compétence – 2.1 Pensée systémique

**CONCEPTS ABORDÉS**

Rayonnement, absorption, émission, opacité, scénario, stratégie, albédo, projection

PRÉPARATION 10 MIN

- Téléchargez et installez *SimClimat* un logiciel éducatif gratuit de simulation de climat, qui permet d'introduire les concepts de rétroaction et de stabilité. Il permet de nombreuses utilisations à des fins éducatives, du collège au niveau universitaire. Il est disponible en anglais et en français, pour Windows, Mac ou smartphone via Google Play ou l'Apple Store. Le téléchargement et l'installation sont très simples.
- Imprimez la **FICHE 6.1** (une par binôme).
- Imprimez la **FICHE 6.2** et **6.3** (une de chaque par binôme, avec deux niveaux de difficulté possibles).

Le mieux ici est de mettre les élèves en binômes, la « programmation en binôme » étant usuelle : une personne effectue le codage/la programmation tandis que l'autre prend des notes, vérifie s'il y a des erreurs, apporte des idées et des conseils, etc. Bien entendu, il convient de changer les rôles régulièrement !

INTRODUCTION 10 MIN

Faites un bref rappel des séances précédentes : l'interdépendance des paramètres physiques (séance 2), les rétroactions (séance 3), ainsi que les données d'entrée, l'échantillonnage et les données de sortie des modèles numériques (séance 4).

Comment peut-on vérifier la fiabilité (ou « validité ») d'un modèle numérique ?

- Tester le modèle par rapport à des données connues (c'est ce que nous allons faire).
- Tester chaque partie du modèle séparément (c'est ce que font les « tests unitaires »).

Chaque binôme reçoit la **FICHE 6.1**.

La moitié des binômes reçoit également la **FICHE 6.2** [CURIEUX], et l'autre la **FICHE 6.3** [EXPERT].

DÉROULEMENT 1 H**→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT**

Utilisation de *SimClimat* en classe :
tutoriel pour enseignants.

**PARTIE 1: DÉMARRER AVEC SIMCLIMAT**

[CLASSE ENTIÈRE] 10 MIN

Pour cette partie, utilisez la **FICHE 6.1**.

L'ensemble de la classe suit les instructions pour effectuer sa première simulation, avec les valeurs réglées par défaut. Cela permet aux élèves d'apprendre comment fonctionne l'interface, qui est très intuitive :

1. Changez la langue, accédez à la documentation et cliquez sur *Exécuter la simulation*.
2. État initial de la simulation : date (à partir d'un menu déroulant) et durée (en années).
3. Choix esthétiques pour les graphiques de sortie.
4. En bas de l'écran, trois onglets permettent de modifier les paramètres d'entrée du modèle :
 - ~ Onglet pour les paramètres astronomiques. Par exemple, cliquez sur la *distance Terre-Soleil* : deux options sont disponibles (notez la présence d'une « figure explicative », qui sera utile pour les définitions).
 - ~ Onglet pour les émissions de CO₂.
 - ~ Onglet pour les rétroactions climatiques.

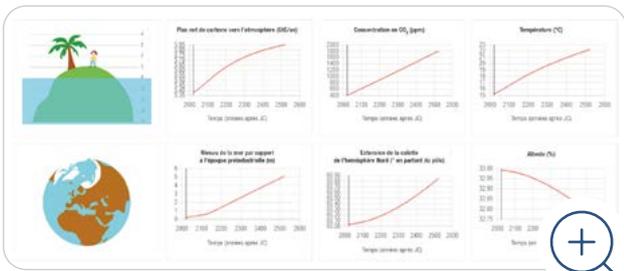
Lancez une première simulation – avec toutes les valeurs par défaut – en cliquant sur le bouton jaune.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

Vous trouverez des captures d'écran des solutions page 56. L'icône ci-contre renvoie directement à cette page et indique donc que vous pouvez visualiser les résultats en grand.



AGRANDIR L'IMAGE



Simulation avec les valeurs par défaut. **AGRANDIR L'IMAGE**
Faites glisser le curseur pour les voir individuellement. **PAGE 56**

Lisez et analysez chacune des six courbes obtenues. Notez que les deux images de gauche illustrent deux des courbes.

Vous pouvez ajuster certains paramètres :

- Un curseur en bas de page permet de changer la date du jour et d'animer les deux images.
- Un bouton de réinitialisation complète se trouve dans le coin supérieur gauche.
- La boîte à outils située dans le coin supérieur droit permet, de gauche à droite, de lire les détails de chaque simulation, de sauvegarder l'une des simulations, d'exporter une simulation ou d'ajouter une nouvelle simulation sans effacer celle(s) en cours. Ce dernier bouton s'avérera très pratique.

Tous ensemble, les élèves répondent aux questions figurant sur la **FICHE 6.1** :

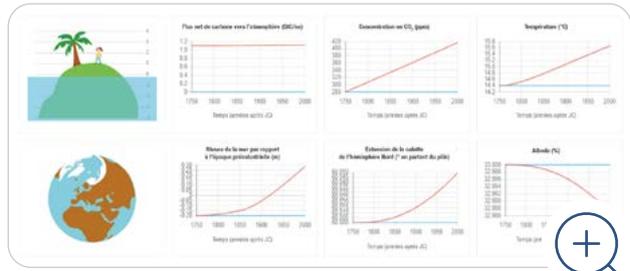
1. En 2100, le réchauffement climatique atteint +1,5°C et le niveau de la mer augmente de 50 cm. Cela concorde avec les objectifs de l'Accord de Paris. Attention : par défaut, la simulation se termine en 2520 !
2. L'utilisateur peut modifier 17 paramètres d'entrée de modèle (ex. paramètres astronomiques, émissions de CO₂, rétroactions climatiques, etc.). La simulation génère six sorties de modèle sous la forme de six diagrammes comme « concentration de CO₂ », « flux net de carbone » et « albédo ».

Les binômes peuvent maintenant effectuer diverses simulations. Demandez-leur de préparer un court exposé pour partager leurs résultats avec les autres élèves en fin de séance.

PARTIE 2 (GROUPE 1): MODÉLISATION DES OBSERVATIONS ACTUELLES [CURIEUX] 50 MIN

Pour ce groupe, utilisez la **FICHE 6.2**.

1. Bien que les différentes reconstructions ne s'alignent pas précisément, elles reproduisent généralement des tendances similaires. Toutes les reconstructions, ainsi que les mesures directes, montrent un réchauffement soudain d'environ +1°C au cours des 150 dernières années.
2. Les paramètres d'entrée, comme la concentration de CO₂, doivent être une valeur constante unique. Entre +0 GtC/an en 1750 avant la révolution industrielle, et le taux actuel de +12 GtC/an, SimClimat propose une moyenne pondérée de +2,5 GtC/an.

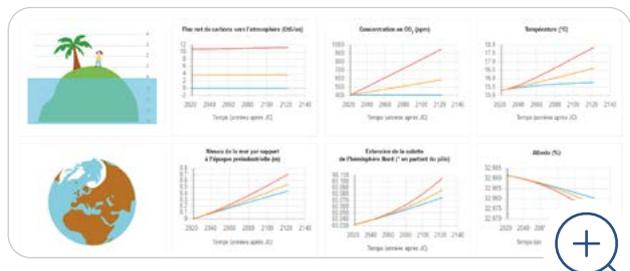


Scénario de contrôle (rouge): **AGRANDIR L'IMAGE**
+2,5 GtC/an dus aux activités humaines. **PAGE 56**
Simulation (bleu) : zéro émission anthropique.

3. En l'absence d'émissions anthropiques, les différents paramètres de sortie restent constants. Cela confirme que les émissions anthropiques sont la cause principale des changements climatiques rapides depuis la fin du 19^e siècle.

Conclusion : À partir des données enregistrées en 1750, *SimClimat* peut reproduire la tendance actuelle des mesures en 2000-2020, ce qui renforce la confiance dans le modèle.

La deuxième série de simulations étudie le concept de **scénarios** : un ensemble donné de paramètres d'entrée, plus ou moins optimistes en fonction de l'évolution de nos sociétés. Chaque simulation basée sur un scénario donné générera des résultats prédisant l'avenir – ceux-ci ne pouvant pas être infirmés ou confirmés à l'avance, ils sont appelés des **projections**.



Scénario de contrôle (orange). Scénario pessimiste (rouge). Scénario optimiste (bleu). **AGRANDIR L'IMAGE**
PAGE 56

Les élèves répondent aux questions sur la fiche. Voici les réponses :

4. Plus les émissions anthropiques sont élevées, plus le réchauffement climatique est important. Cela confirme la séance 1 de ce manuel.
5. En raison de l'inertie thermique du système, la température continue d'augmenter avant de se stabiliser. Ce scénario optimiste diffère de la simulation pré-industrielle vue précédemment, avec « zéro émission anthropique », car désormais la simulation prend en compte les émissions faites depuis la révolution industrielle.
6. Les projections pessimistes, de contrôle et optimistes ressemblent aux trajectoires RCP8.5, RCP4.5 et RCP2.6 établies par le GIEC.

Conclusion: *SimClimat* peut être utilisé pour imiter grossièrement les modèles plus complexes utilisés par le GIEC. En définissant des scénarios probables pour l'avenir, *SimClimat* peut fournir des projections pour le climat futur.

PARTIE 2 (GROUPE 2): MODÉLISATION DES PÉRIODES GLACIAIRES [EXPERT] 50 MIN

Pour ce groupe, utilisez la **FICHE 6.3**.

Le document 4 montre l'évolution de la température reconstituée à partir de la composition isotopique des carottes de glace de Vostok (Antarctique).

On observe une forte variabilité des températures, avec des périodes chaudes tous les 100 000 ans, dites interglaciaires, entrecoupées de périodes plus froides (de 10 °C environ), dites glaciaires.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

D'un point de vue mathématique, les lois de la physique peuvent être calculées même si le signe de la variable temporelle t est négatif. Ainsi, en partant du présent et en remontant dans le temps, un bon modèle devrait pouvoir reproduire les données du passé. *SimClimat*, en revanche, ne peut pas revenir en arrière.

Analyse des cycles de Milankovich :

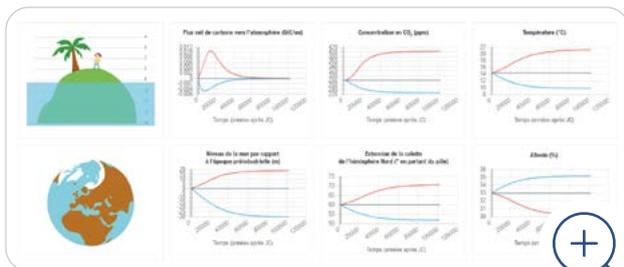
Les paramètres orbitaux de la Terre sont responsables des périodes glaciaires qui se produisent environ tous les 100 000 ans (n'hésitez pas à utiliser les « figures explicatives » intégrées à *SimClimat* pour aider les élèves à comprendre les paramètres orbitaux). Les réponses aux questions sont les suivantes :

1. Nous comptons 9 maxima en excentricité, 20 maxima en obliquité et 37 maxima en précession.
2. Respectivement, 7 (soit 77,7 %), 18 (90,0 %) et 21 (56,7 %) de ces maxima coïncident avec les maxima de température. Par conséquent, nous préférons nous intéresser surtout à l'obliquité.
3. Le plus souvent, il y a un maximum de température lorsque l'obliquité est maximale.

→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT

En fait, à chaque fois qu'un paramètre orbital est à son maximum, il y a une augmentation de la température. Mais l'obliquité est la plus évidente et la plus facile à comprendre.

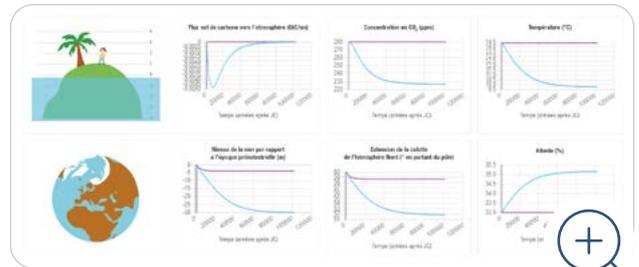
Dans l'expérience suivante, la température devrait augmenter lorsqu'on simule une obliquité maximale.



Scénario de contrôle (gris). « Scénario d'obliquité minimale » (bleu). Scénario d'obliquité maximale (rouge). **AGRANDIR L'IMAGE PAGE 57**

4. La simulation de contrôle reste très stable.
5. Notre hypothèse est confirmée : **lorsque l'obliquité est maximale, la température augmente, et la température la plus basse coïncide avec une obliquité minimale**, même s'il faut des millénaires pour atteindre l'équilibre.
6. La simulation la plus froide, en bleu, est en accord avec la température (-4°C contre -5°C), mais sous-estime la baisse du niveau de la mer (-30 m seulement contre -130 m).
7. Dans la simulation bleue (correspondant à une glaciation), l'albédo de la Terre augmente et la concentration atmosphérique de CO₂ diminue.

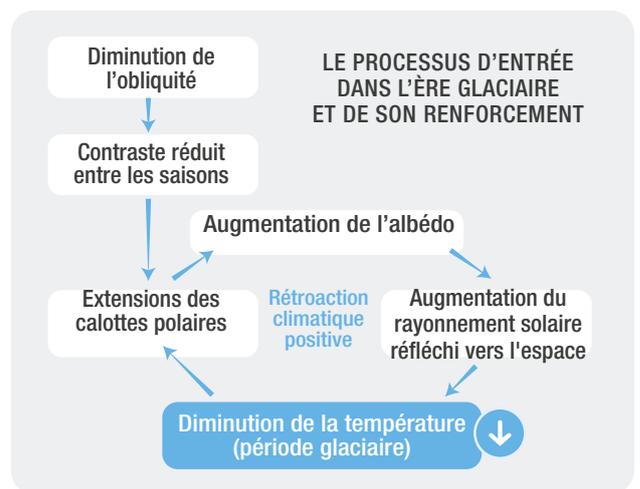
Les élèves testent d'abord l'albédo. Un albédo constant devrait conduire à une température constante.



Contrôle (obliquité minimale) en bleu. **AGRANDIR L'IMAGE PAGE 57**
Obliquité minimale et albédo constant (violet).

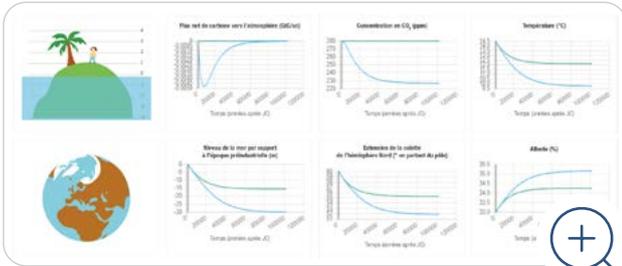
La réponse à la question correspondante sur la fiche est la suivante :

8. Oui, **un albédo constant conduit à une température constante**. Par conséquent, dans la réalité, il doit y avoir une rétroaction liée à l'albédo qui génère directement un refroidissement de la planète.



Notez que la case « contraste réduit entre les saisons » implique que les étés sont plutôt frais et la neige ne fond pas complètement.

En option, les élèves peuvent vérifier la rétroaction du puits de carbone océanique : un taux de solubilisation constant du CO₂ devrait conduire à une température constante.



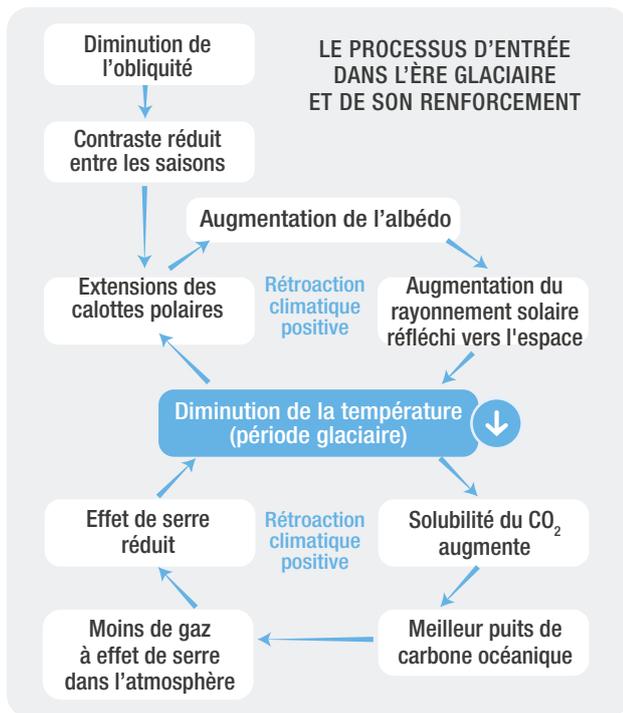
Contrôle (obliquité minimale) en bleu.

Obliquité minimale et solubilisation constante (en vert).

AGRANDIR L'IMAGE
PAGE 57

Les élèves répondent :

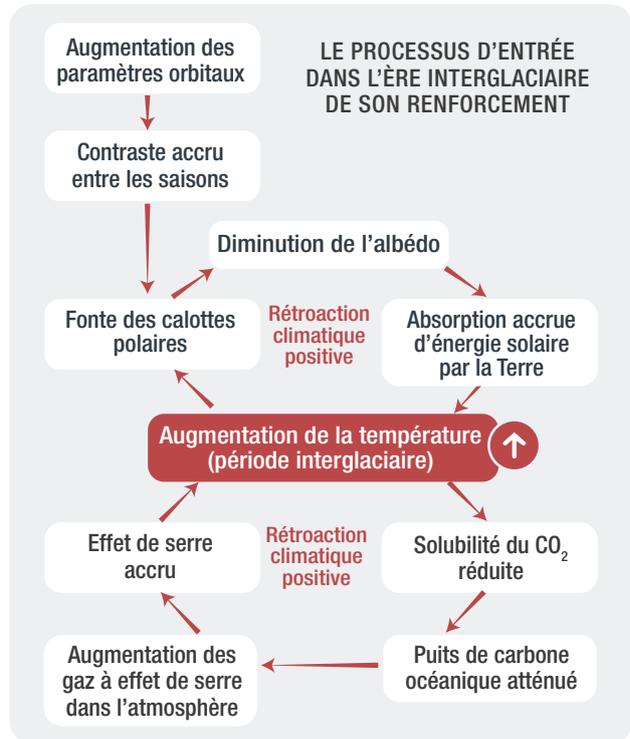
9. L'océan peut agir comme un puits de carbone et peut déclencher une glaciation, l'hypothèse est confirmée.



10. Un taux de solubilisation constant entrave le processus de glaciation, mais ne l'arrête pas. On déduit de ces deux expériences que la rétroaction de l'albédo est prédominante par rapport à la rétroaction des puits océaniques. Dans la réalité, la rétroaction de l'albédo déclenche le début d'une glaciation, qui est légèrement favorisée par la rétroaction du puits de carbone océanique.

Confirmez oralement que tout cela est vrai pour les autres paramètres orbitaux. (S'il reste du temps, les élèves plus avancés peuvent tester un autre paramètre orbital en suivant la même méthode).

Conclusion : *SimClimat* reproduit effectivement les tendances des paléoclimats, ce qui renforce la confiance dans le modèle.



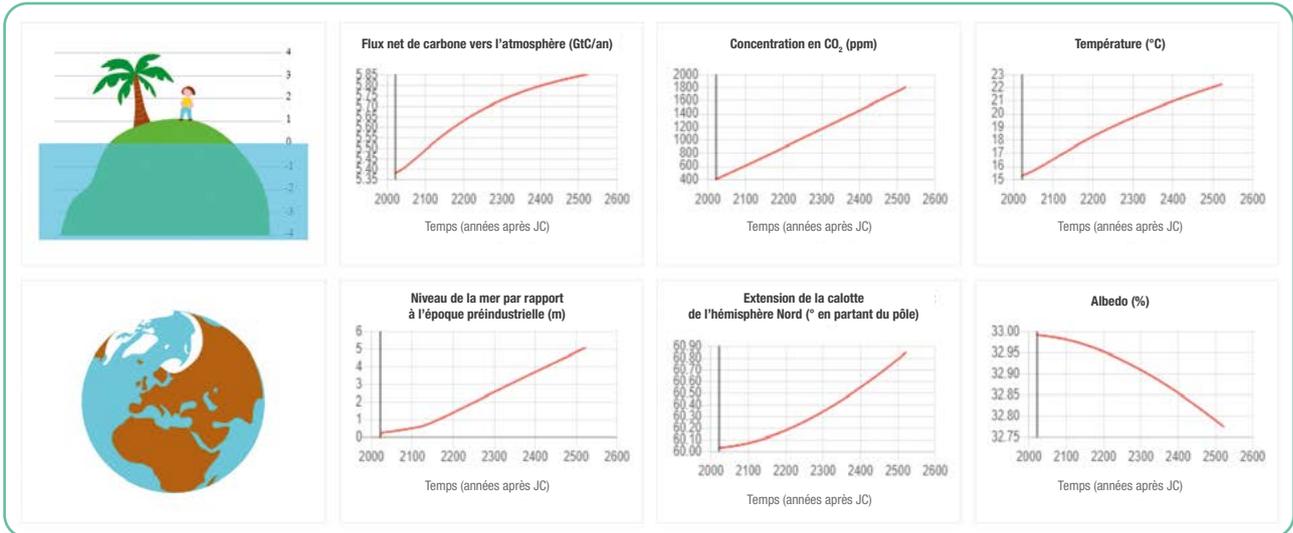
CONCLUSION 20 MIN

Chaque binôme explique ses résultats à la classe. *SimClimat* est notamment capable de reproduire des mesures actuelles, de simuler des paléoclimats et de simuler plusieurs rétroactions positives. Pour vérifier la validité d'un modèle, il convient d'effectuer des tests et de les comparer à des données climatiques «réelles». Plus le nombre de tests réussis est élevé, **plus la confiance dans le modèle est élevée**. Cependant, des incertitudes subsistent ! C'est pourquoi les rapports du GIEC utilisent simultanément de nombreux modèles.

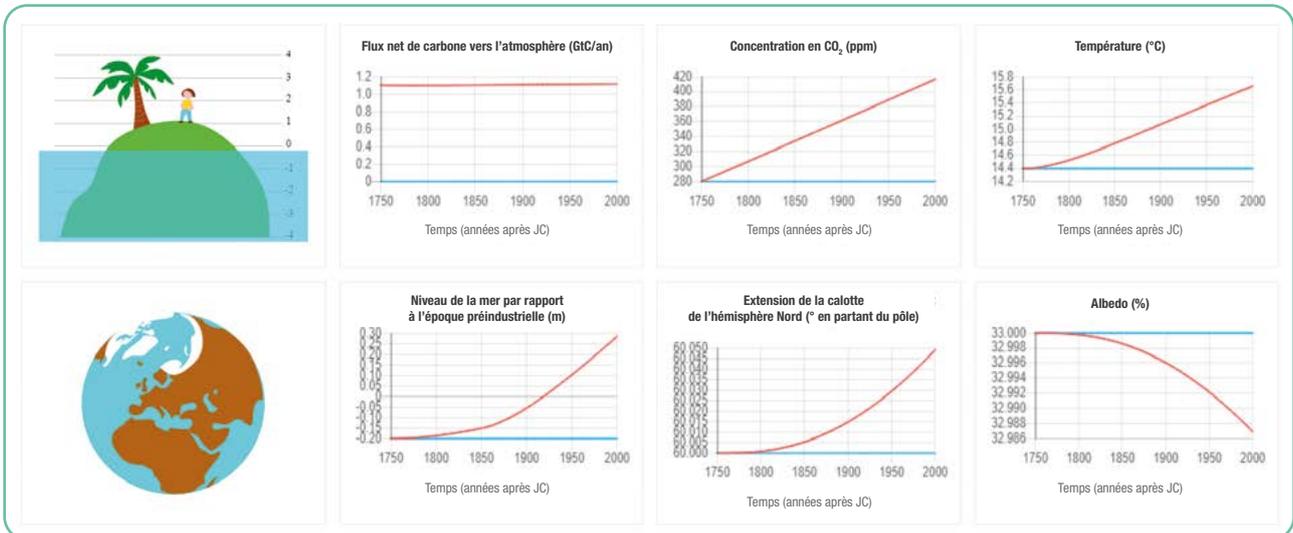
Résumez :

- Les modèles climatiques numériques sont **évalués** en fonction de leur capacité à reproduire des faits bien documentés :
 - ~ des mesures historiques et/ou actuelles ;
 - ~ les paléoclimats (ex. périodes glaciaires, interglaciaires) ;
 - ~ éventuellement, le climat d'autres planètes.
- La **confiance** en un modèle est établie lorsque les données de simulation s'alignent sur les données réelles.
- Un scénario est un ensemble donné de paramètres d'entrée, choisis pour des raisons historiques, politiques et éthiques.
- Une simulation est une exécution d'un modèle avec un ensemble de données d'entrée. Une projection est une simulation particulière qui ne peut être comparée à des données réelles, car elle prédit des événements futurs vraisemblables.
- Le GIEC compile les projections de nombreux modèles différents, rassemblant les tendances les plus fiables pour l'avenir.

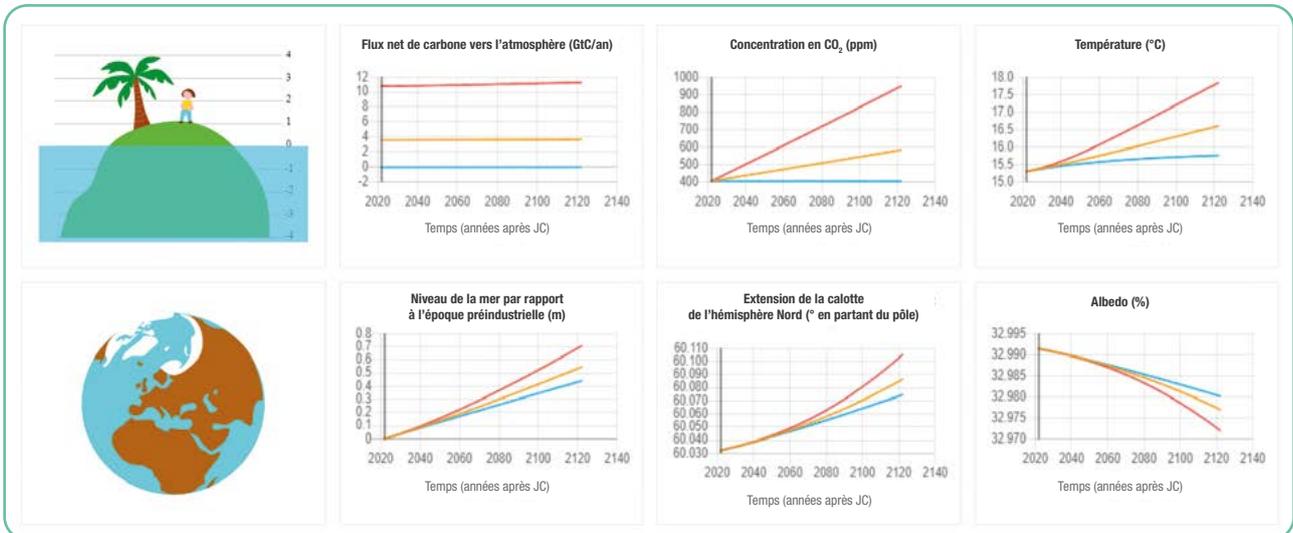
SIMCLIMAT : CAPTURES D'ÉCRAN DES SOLUTIONS



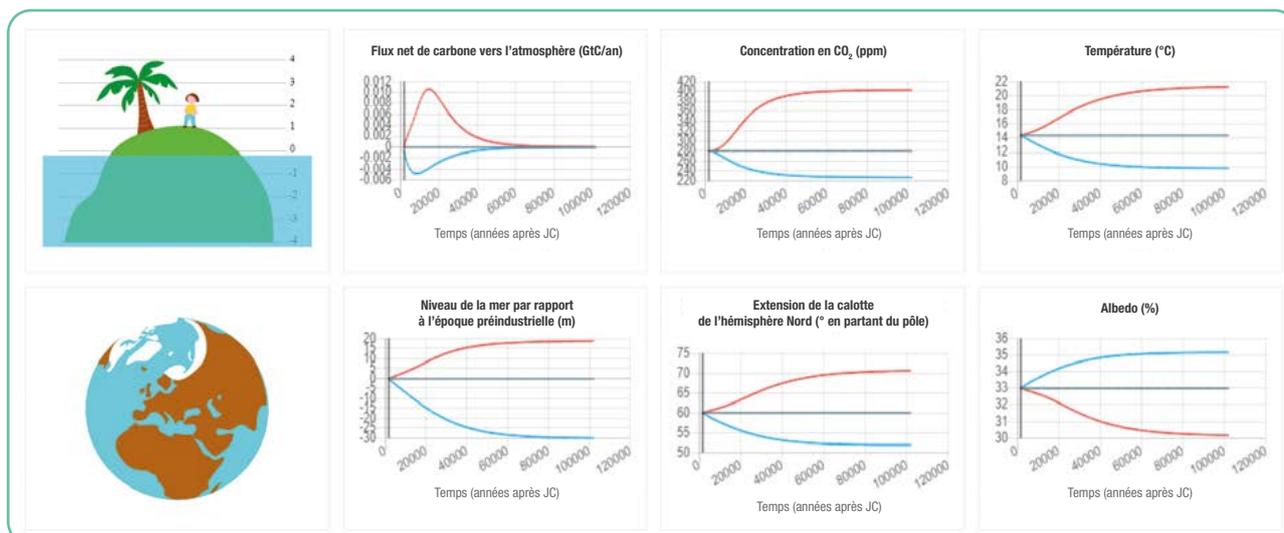
Simulation *SimClimat* avec des valeurs par défaut. (Note : faites glisser le curseur pour les voir individuellement).



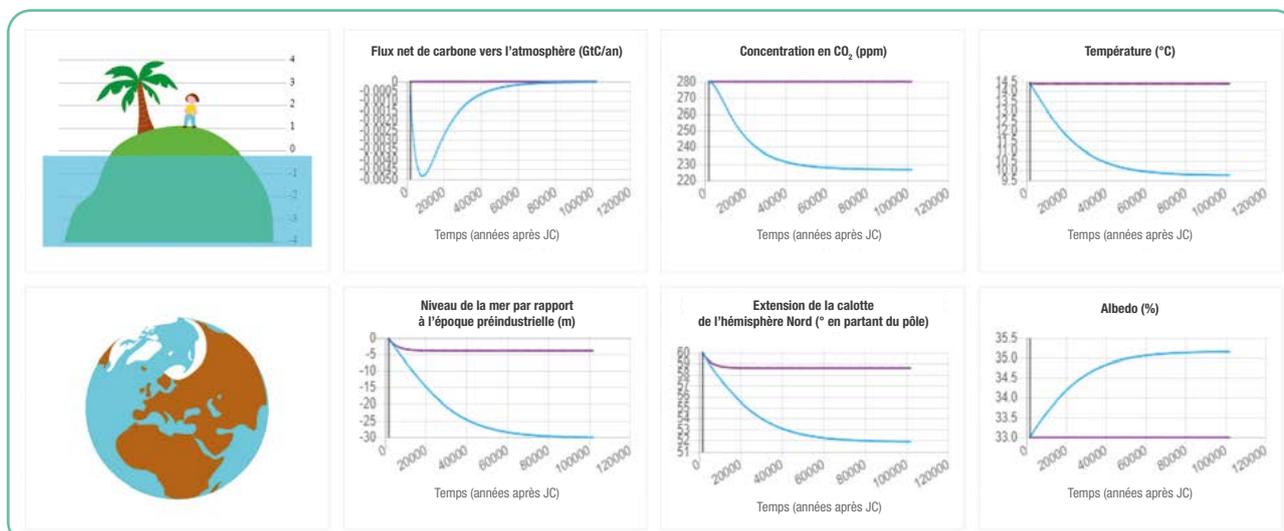
EXPÉRIENCE N°1. Reproduction des observations actuelles avec *SimClimat*. Scénario de contrôle (rouge) : +2,5 GtC/an dus aux activités humaines. Simulation (bleu) : zéro émission anthropique.



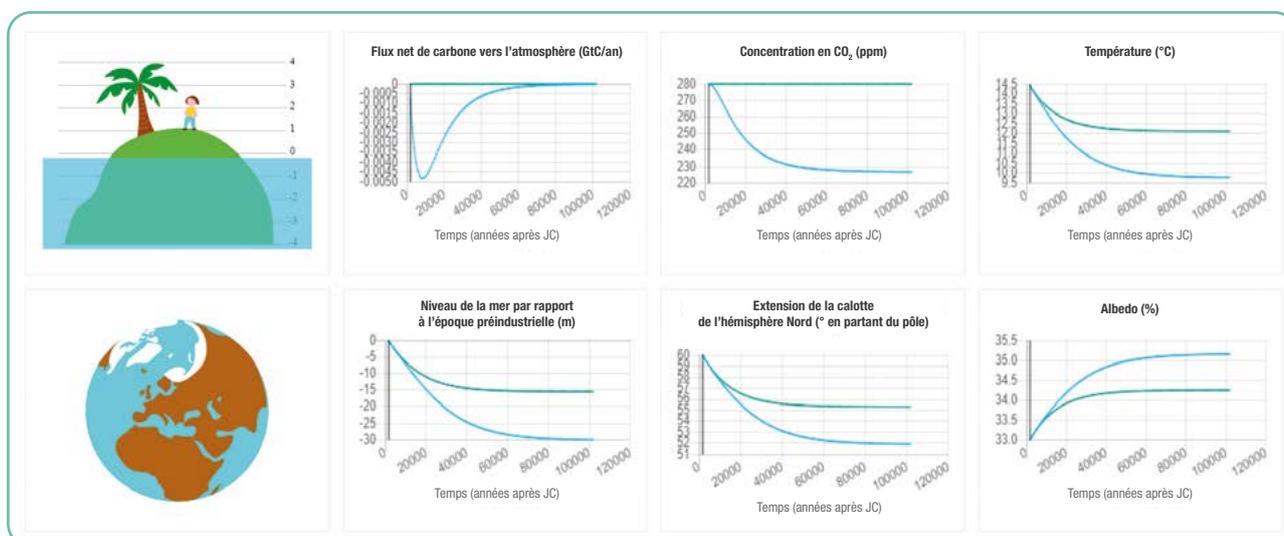
EXPÉRIENCE N°2. Utilisation de *SimClimat* pour les projections climatiques. Scénario de contrôle (orange). Scénario pessimiste (rouge). Scénario optimiste (bleu).



EXPÉRIENCE N°3. Vérification de l'influence de l'obliquité. Scénario de contrôle (gris). « Scénario d'obliquité minimale » (bleu). « Scénario d'obliquité maximale » (rouge).



EXPÉRIENCE N°4. Évaluation de la rétroaction liée à l'albédo. Contrôle (obliquité minimale) en bleu. Obliquité minimale et albédo constant (violet).



EXPÉRIENCE N°5. Évaluation de la rétroaction liée aux puits océaniques. Contrôle (obliquité minimale) en bleu. Obliquité minimale et solubilisation constante du CO₂ (vert).

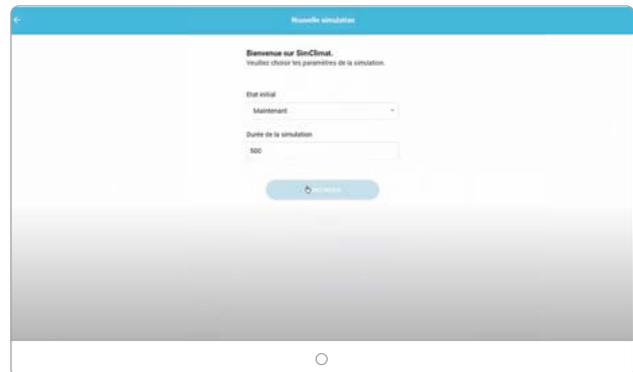


DÉMARRER AVEC SIMCLIMAT

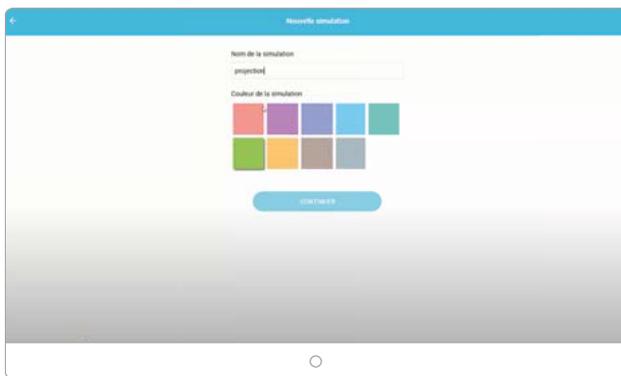
Lancez *SimClimat* et effectuez votre première simulation avec toutes les valeurs par défaut.



Page d'accueil



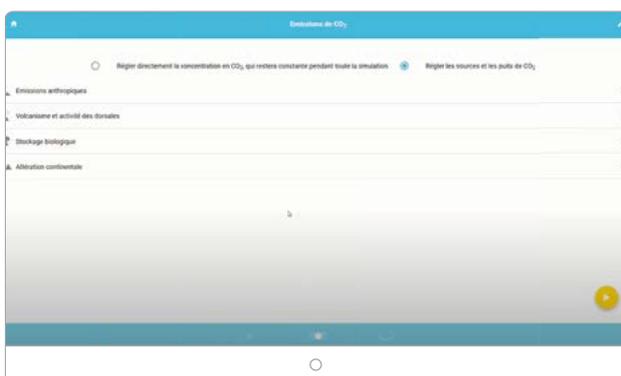
ÉCRAN 1
Date initiale et durée de la simulation



ÉCRAN 2
Couleur et nom de la simulation



ÉCRAN 3 - PREMIER ONGLET
Paramètres astronomiques



ÉCRAN 3 - DEUXIÈME ONGLET
Émissions de CO₂



ÉCRAN 3 - TROISIÈME ONGLET
Rétroactions climatiques

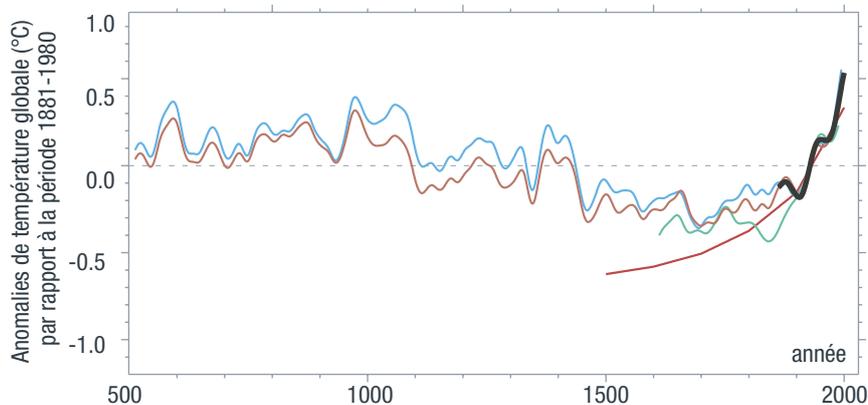
- Question 1.** Par défaut, *SimClimat* suppose des émissions anthropiques de CO₂ de 12 Gt/an. Cette simulation illustre-t-elle ce que vous avez entendu sur le climat projeté de la Terre en 2100 ? (Indice : utilisez le curseur pour lire tous les graphiques à la bonne date).
- Question 2.** *SimClimat* est un modèle numérique. Pouvez-vous énumérer toutes ses données d'entrée et de sortie ?

MODÉLISER LES OBSERVATIONS ACTUELLES

Question 1. À partir des documents 1 et 2, décrivez les variations de la température globale par le passé et expliquez la cause de son évolution récente.

Document 1. Tendances des anomalies de température globale au cours des 1 500 dernières années, selon différentes reconstructions paléoclimatiques

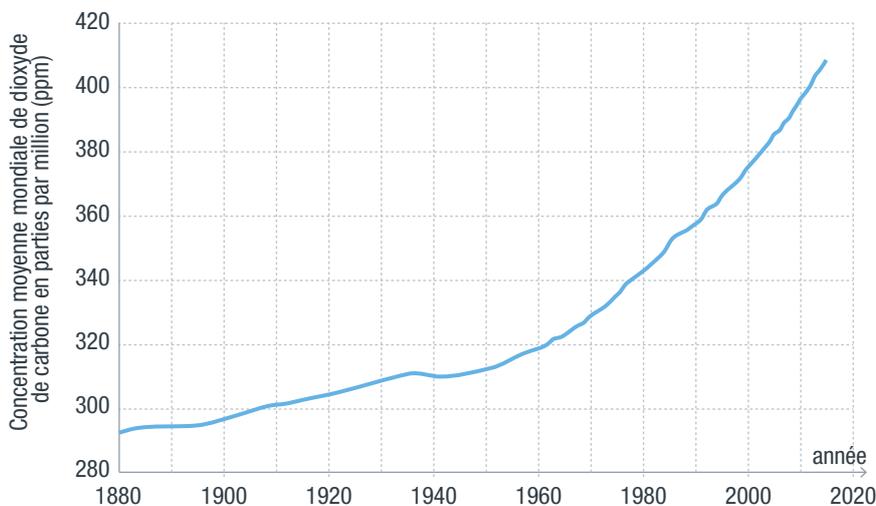
- ● ● ●
Courbes colorées :
Températures reconstituées
(obtenues grâce à des archives
paléo-climatiques : cernes d'arbres,
carottes de glace, dates historiques
de récolte, etc.)
- Courbe noire :
Températures (mesures directes)



Source : 2007, GIEC AR5 Groupe de travail 1, Chapitre 5. Adapté de la figure 5.7. (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).

Document 2. Évolution de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère depuis 1880

Depuis les années 1850, la révolution industrielle a permis des avancées scientifiques, technologiques, économiques et politiques sans précédent qui ont affecté tous les secteurs de la société humaine, depuis l'agriculture jusqu'à la médecine, et engendré une hausse du niveau de vie, profitant d'abord à l'Europe et à l'Amérique du Nord. Par ailleurs, l'utilisation toujours croissante des combustibles fossiles comme source d'énergie, ainsi que la croissance démographique, mène aux émissions massives de gaz à effet de serre.



Source : 2021, ESRL/ETHZ/NCEI. Adapté de la figure « Dioxyde de carbone atmosphérique et température de surface de la Terre ». Disponible sur le site de NOAA Climate.gov (<https://www.climate.gov/media/13560>)

→ Utilisez *SimClimat* pour exécuter et comparer les simulations ci-après, en utilisant les scénarios suivants :

EXPÉRIENCE N°1	SCÉNARIO DE CONTRÔLE	SIMULATION
État initial	Pré-industriel	Pré-industriel
Durée de la simulation	250 ans	250 ans
Émissions anthropiques	+2,5 GtC/an	+0,0 GtC/an



MODÉLISER LES OBSERVATIONS ACTUELLES

Question 2. Pourquoi le scénario de contrôle utilise-t-il une valeur de +2,5 GtC/an pour les émissions anthropiques alors que la valeur actuelle est plutôt de 12 GtC/an ?

Question 3. Décrivez le climat en 2000 dans l'hypothèse d'une absence d'émissions anthropiques. Quelle semble être la principale cause de l'évolution rapide du climat au cours du siècle dernier ?

SimClimat semble pouvoir reproduire les mesures actuelles, mais peut-il nous donner un aperçu de ce que sera le climat de la Terre à l'avenir ? Nous partons du consensus scientifique actuel selon lequel l'augmentation de la température globale est due à l'augmentation des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère par les activités humaines. À l'avenir, nous pouvons supposer que les émissions de CO₂ resteront constantes. Mais nous pouvons également supposer que les émissions continueront d'augmenter en raison de la croissance démographique et de l'élévation du niveau de vie dans le monde. Ou, idéalement, nous pouvons supposer que, face aux risques associés au réchauffement climatique, les gouvernements prendront des mesures drastiques et que les émissions de CO₂ diminueront.

→ Utilisez *SimClimat* pour exécuter et comparer les simulations ci-après, en utilisant les scénarios suivants :

EXPÉRIENCE N°2	SCÉNARIO DE CONTRÔLE	SCÉNARIO PESSIMISTE	SCÉNARIO OPTIMISTE
État initial	Aujourd'hui	Aujourd'hui	Aujourd'hui
Durée de la simulation	100 ans	100 ans	100 ans
Émissions anthropiques	+8,0 GtC/an	+24,0 GtC/an	+0,0 GtC/an

Question 4. Expliquer l'évolution de la température globale et la cause de cette évolution.

Question 5. Décrivez l'évolution de la température dans le scénario optimiste.

Question 6. Les projections climatiques évaluées dans les rapports du GIEC sont basées sur des simulations utilisant différents modèles climatiques beaucoup plus complexes que *SimClimat*. Le document 3 présente les projections de l'évolution de la température mondiale (b) et de l'élévation du niveau des mers (c) pour différents scénarios de concentration de CO₂ dans l'atmosphère (a). Quel est le scénario optimiste ? Le pessimiste ? Pouvez-vous comparer ces résultats à vos simulations *SimClimat* ?

Document 3. Projections réalisées par les modèles participant au projet de comparaison de modèles couplés (CMIP)

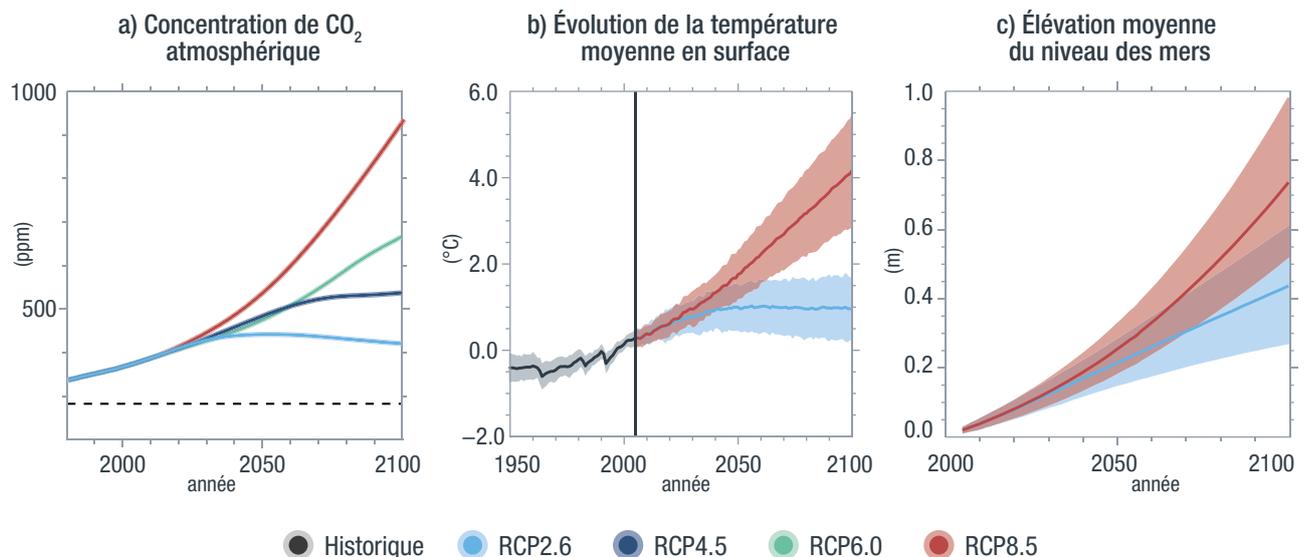


Figure adaptée. Source : 2013, GIEC AR5 Groupe de travail 1, Fig. SPM. Disponible sur le site web du GIEC (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf)

- a) Quatre scénarios différents d'évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère.
- b) Les lignes en gras indiquent l'anomalie de la température moyenne à la surface de la Terre (différence par rapport à la période de référence 1850-1900), simulée avec différents modèles climatiques, pour les scénarios RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge). La marge autour des lignes en gras correspond à des plages d'incertitudes.
- c) Idem, mais pour l'élévation du niveau des mers.

1 Source : Global Carbon Budget, 2023. (en anglais : <https://globalcarbonbudget.org/download/933/?tmstvt=1701441499>)

MODÉLISATION DES PÉRIODES GLACIAIRES

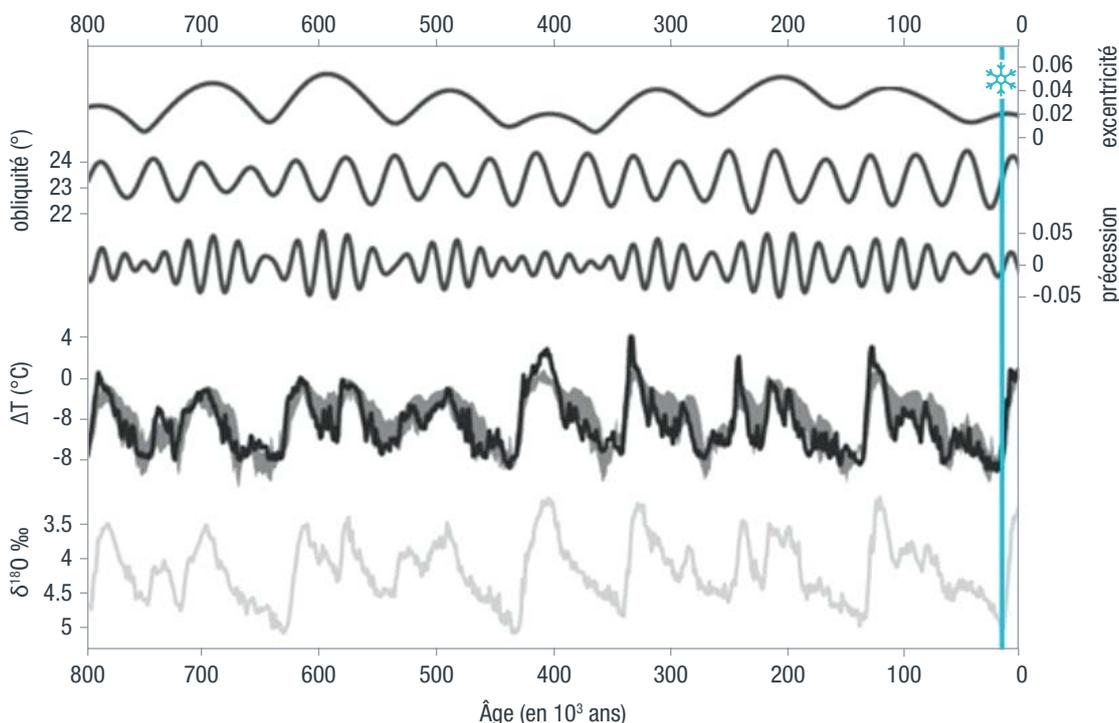
Nous nous trouvons actuellement dans une période interglaciaire qui dure depuis 10 000 ans, le dernier maximum glaciaire ayant eu lieu il y a 21 000 ans. Les reconstitutions de température dans d'autres parties du monde, combinées aux archives sédimentaires, montrent que lors du dernier maximum glaciaire, la température globale était de 5 °C de moins que la température actuelle, qu'une calotte glaciaire recouvrait toute l'Europe du Nord et que le niveau des mers était de 130 m en-dessous du niveau actuel.

Document 4. Composition isotopique mesurée dans les carottes de glace de Vostok, dans l'Antarctique

Anomalie de température déduite de la composition isotopique des carottes de glace.

Les variations de l'orbite terrestre à l'échelle des temps géologiques sont définies par trois paramètres orbitaux : la précession, l'obliquité et l'excentricité.

La **ligne bleu clair** correspond au dernier maximum glaciaire (il y a 21 000 ans).



Source : 2013, GIEC AR5 Groupe de travail 1 Chapitre 5. Adapté de la figure 5.3 p. 400 : « Orbital parameters and proxy records over the past 800 kyr ». Disponible sur le site web du GIEC, en anglais (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)

Hypothèse: Indépendamment de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, les paramètres orbitaux peuvent-ils être à l'origine des variations de température à la surface de la Terre ?

- Question 1.** Comptez le nombre de maxima locaux des courbes d'excentricité, d'obliquité et de précession.
- Question 2.** Combien de ces maxima d'excentricité coïncident avec des maxima ou des minima de température ? Qu'en est-il des maxima d'obliquité et de précession ?
- Question 3.** Formulez votre propre hypothèse : « Le plus souvent, il y a un maximum de température lorsque... ».



MODÉLISATION DES PÉRIODES GLACIAIRES

→ Utiliser *SimClimat* pour tester votre hypothèse, en utilisant les scénarios suivants :

EXPÉRIENCE N°3	SCÉNARIO DE CONTRÔLE	SCÉNARIO « OBLIQUITÉ MINIMALE »	SCÉNARIO « OBLIQUITÉ MAXIMALE »
État initial	Pré-industriel	Pré-industriel	Pré-industriel
Durée de la simulation	100 000 ans	100 000 ans	100 000 ans
Oblivité	Aujourd'hui (23,5°)	Minimum (21,8°)	Maximum (24,4°)

Question 4. À quel point votre simulation de contrôle est-elle stable ?

Question 5. Votre hypothèse sur le lien entre température et obliquité est-elle confirmée ou infirmée ?

Question 6. Dans votre scénario « le plus froid », comparez le niveau de la mer et l'étendue de la calotte glaciaire aux mesures historiques citées en introduction de cette fiche 6.3.

Bien que la modification des paramètres orbitaux puisse être à l'origine de périodes glaciaires, elle ne modifie pas la quantité totale d'énergie solaire reçue annuellement par la Terre. Question complémentaire : Quel facteur induit par les paramètres orbitaux pourrait déclencher une glaciation ?

Question 7. Dans le jeu de plateau de la séance 3, une carte portait sur la « rétroaction climatique de l'albédo ». Un albédo élevé limiterait-il ou renforcerait-il la glaciation ?

EXPÉRIENCE 4.

Hypothèse : L'obliquité a un impact sur la quantité d'énergie que reçoivent les calottes polaires en été, et donc sur la fonte de ces dernières. L'albédo étant la fraction du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace, plus la calotte glaciaire est large, plus l'albédo est élevé et moins la Terre conserve l'énergie reçue. La rétroaction liée à l'albédo pourrait donc déclencher une glaciation.

EXPÉRIENCE N°4	SCÉNARIO DE CONTRÔLE	SIMULATION
État initial	Pré-industriel	Pré-industriel
Durée de la simulation	100 000 ans	100 000 ans
Oblivité	Minimum (21,8°)	Minimum (21,8°)
Albédo	Valeur par défaut (calculée par <i>SimClimat</i> en fonction de la température, permettant la rétroaction)	Constant, égal à sa valeur pré-industrielle (33%)

Question 8. Votre hypothèse est-elle confirmée ou infirmée ?

EXPÉRIENCE 5. (FACULTATIVE)

Hypothèse : L'océan peut agir comme un puits de carbone parce que le CO₂ se dissout dans l'eau. Le CO₂ se dissout plus facilement dans l'eau froide. Les bulles d'air retrouvées dans les carottes de glace de l'Antarctique confirment que pendant les périodes glaciaires, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère était de 100 ppm en-dessous de celle observée pendant les périodes interglaciaires. Ainsi, la rétroaction du puits océanique pourrait déclencher une glaciation.

EXPÉRIENCE N°5	SCÉNARIO DE CONTRÔLE	SIMULATION
État initial	Pré-industriel	Pré-industriel
Durée de la simulation	100 000 ans	100 000 ans
Oblivité	Minimum (21,8°)	Minimum (21,8°)
Puits de carbone océanique	Valeur par défaut (calculée par <i>SimClimat</i> en fonction de la température)	Valeur indépendante de la température et constante à celle d'aujourd'hui

Question 9. Votre hypothèse est-elle confirmée ou infirmée ?

Question 10. Laquelle des deux est la rétroaction dominante ?

SÉANCE 7 ÉLABORER DES SCÉNARIOS ET OBSERVER LES RÉPONSES DES MODÈLES

DISCIPLINES CONCERNÉES

Mathématiques
Physique
SVT

DURÉE

Préparation : 10 min
Activité : 1h

TRANCHE D'ÂGE

Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

Analyse documentaire
Construction et analyse de graphiques

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves font des choix et ajustent des paramètres pour élaborer différents scénarios. Ils examinent les projections pour évaluer l'impact de leurs différents choix. Les scénarios élaborés dépendent ici des choix faits par les agriculteurs, et la réponse du modèle est basée sur des données scientifiques biologiques. De la même manière, les scénarios du GIEC sont basés sur des choix de société, et la réponse du modèle est basée sur des données scientifiques physiques.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 1 – Incarner les valeurs de la durabilité
Compétence – 1.1 Accorder de la valeur à la durabilité



CONCEPTS ABORDÉS

Paramètres, scénario, choix de société, simulation climatique, projection climatique

PRÉPARATION 10 MIN

- Il vous faudra un ordinateur et un équipement audio pour présenter ces trois vidéos en classe :

Vidéo CLIM «Le système climatique de la Terre », par Fiona O'Connor (MET Office Science, Royaume-Uni).



VISIONNER LA VIDÉO ↗

Vidéo CLIM «Stratégies d'atténuation du changement climatique», par Joeri Rogelj (Imperial College, Londres, Royaume-Uni).



VISIONNER LA VIDÉO ↗

Vidéo CLIM «Conférences des Nations Unies sur les changements climatiques», par Sofia Palazzo (Imperial College, Londres, Royaume-Uni).



VISIONNER LA VIDÉO ↗

- Imprimez les **FICHES 7.1** et **7.2** pour chaque binôme.
- Imprimez la **FICHE 7.3** pour chaque binôme [APPRENTI].
- Utilisez un ordinateur et une version numérique de la **FICHE 7.4** (sur LibreOffice ou OpenOffice, par exemple) par binôme [CURIEUX].

INTRODUCTION 30 MIN

Dans la séquence A, les élèves ont vu que l'humain est responsable des changements climatiques actuels causés par les grandes quantités de gaz à effet de serre émises dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle.

Posez à vos élèves plusieurs questions sur le lien entre alimentation et émissions de GES :

- D'où vient votre nourriture ? Le potager familial ? Le supermarché ? Une ferme ?*
- Qu'est-ce qu'une exploitation laitière ?*

Exemple : Une exploitation laitière produit du lait. Les vaches mangent de l'herbe (ou sont nourries au foin, au soja, au maïs, etc. dans l'étable). Le lait peut être transformé en fromage, en yaourt ou en beurre, qui peuvent être parfois produits et vendus à la ferme.

- Expliquez l'impact des activités agricoles sur les émissions de gaz à effet de serre.

Pour les aider à répondre, vous pouvez regarder la vidéo CLIM «Le système climatique de la Terre». Elle explique comment les scientifiques prennent en compte différents paramètres (vapeur d'eau, eau liquide, concentration de méthane) pour étudier la chimie de l'atmosphère.

- Décrivez les différents types d'exploitations agricoles dans votre pays et/ou dans le monde. Qu'est-ce qui détermine la façon dont les agriculteurs cultivent leurs terres ?*

Réponses attendues : climat, qualité des sols, races de vaches utilisées dans la région, pratiques agricoles de la région, choix de l'agriculteur (marge financière, conviction écologique, pratiques culturelles, etc.). Mentionnez les races et les pratiques d'élevage si elles ne sont pas évoquées.

DÉROULEMENT 40 MIN

1. Les élèves étudient la production du lait. Ils lisent la **FICHE 7.1** et remplissent le tableau.

2. Demandez-leur de se mettre dans la peau d'un éleveur de vaches laitières et d'écrire un court texte sur leur exploitation idéale.

Certains voudront peut-être le partager avec leurs camarades. Ils doivent mettre l'accent sur les valeurs et opinions ayant guidé leur choix. Par exemple, si un élève souhaite que ses vaches passent le plus clair de leur temps à paître dans de grandes prairies, c'est probablement qu'il ou elle se préoccupe du bien-être animal et/ou s'intéresse à l'écologie. Relevez les motivations ayant trait aux coutumes locales, à la culture et aux facteurs économiques.

3. Dans cette séance, on imagine que l'exploitation est située à côté d'une usine de production de yaourt. Demandez aux élèves de choisir un modèle d'élevage laitier pour approvisionner l'usine sur la **FICHE 7.2** (ne cocher qu'une seule case, chacune représentant un ensemble de paramètres).

4. Les [APPRENTIS] peuvent répondre aux questions sur la **FICHE 7.3**, tandis que les [CURIEUX] peuvent directement travailler sur la **FICHE 7.4**.

NOTE À L'ENSEIGNANT

TENIR COMPTE DU BIEN-ÊTRE ANIMAL DANS L'ÉDUCATION

La jeune génération est davantage sensibilisée aux questions de bien-être animal, grâce aux informations diffusées sur les réseaux sociaux (notamment sur les abattoirs et les mégafeux). Cela se traduit par des changements dans leur mode de consommation, et en particulier dans leur régime alimentaire¹.

Le bien-être animal est de plus en plus pris en compte dans les programmes scolaires. Cependant, les enseignants en agronomie ont encore tendance à « éviter des savoirs controversés liés aux émotions des bovins, qui peuvent se heurter aux valeurs et aux pratiques dominantes du milieu de l'élevage »².

1 Source : 2022, Péraud-Puigsegur, S., in: *Annuel de la Recherche en Philosophie de l'Éducation*, 2, 1 18, « La grenouille, la vache et le koala. Que faire de la question animale à l'école de l'anthropocène? »

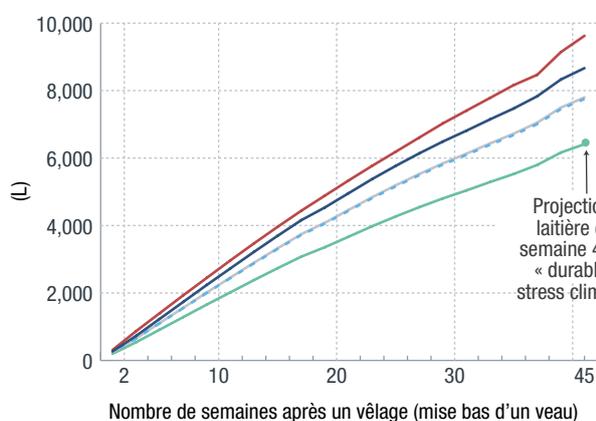
2 Source : 2018, Lipp, A., et Simonneaux, L., in *RDST 18*, 137 160, « Savoirs et controverses liés au bien-être des bovins: Comment des enseignants de zootechnie les prennent-ils en compte? » (<https://doi.org/10.4000/rdst.2072>)

SOLUTION : QU'OBSERVENT LES ÉLÈVES AU SEIN DE LEUR PRODUCTION LAITIÈRE ?

Les élèves identifient certains paramètres qui influencent la production laitière (exemple de l'agriculture intensive au Paraguay).

Ils doivent ajuster ces paramètres (agriculture plus ou moins intensive, plus ou moins éthique, dans des conditions climatiques plus ou moins difficiles) en fonction de leurs opinions et de leurs valeurs.

Enfin, ils évaluent leurs choix en observant des projections intégrant différents ensembles de paramètres. Les projections sont basées sur des données observées, non sur un modèle réel. L'accent ici n'est pas mis sur le modèle. Les élèves n'ont pas besoin de savoir comment les quantités de lait sont calculées pour établir les scénarios. Il leur est simplement demandé d'identifier les paramètres qui déterminent les différents scénarios.



Courbes de production laitière cumulée. Elles sont obtenues pour différentes pratiques de production laitière (scénarios) avec des vaches de race Holstein. Les différents scénarios donnent des quantités différentes de production laitière totale en litres (L).

- Production laitière (L), race Holstein, agriculture biologique, sans stress climatique
- Production laitière (L), race Holstein, agriculture durable, sans stress climatique
- Production laitière (L), race Holstein, sous stress climatique
- Production laitière (L), race Holstein, allongement des lactations, sans stress climatique
- Production laitière (L), race , sans stress climatique

CONCLUSION 10 MIN

Les élèves ont décidé une manière de produire du lait de vache, en fonction des traditions, de la viabilité économique et/ou de considérations écologiques. Ils ont choisi un ensemble de paramètres (ex. race Holstein + agriculture non biologique + conditions climatiques difficiles – courbe grise). En choisissant leurs propres scénarios, ils comprennent que ceux-ci relèvent de **choix de société**.

Les élèves ont analysé la courbe représentant les différentes **projections** de production de lait par

vache après la naissance d'un veau. Certaines projections donnent une production laitière plus élevée que d'autres (voir la courbe de l'élevage intensif, par exemple), basée sur la biologie de la vache. Grâce aux projections laitières établies, ils peuvent évaluer leur scénario, en fonction de différents critères (production, éthique, écologie, etc.).

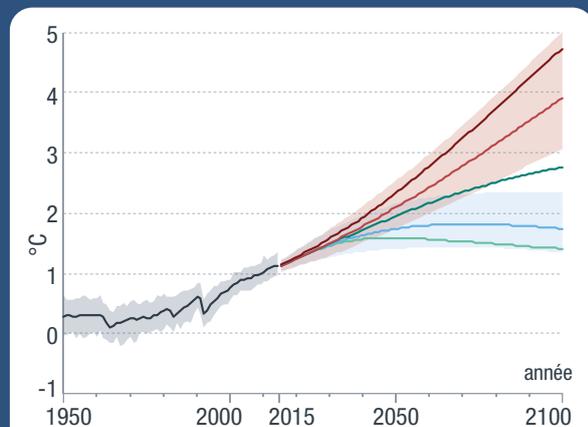
Ce type de scénarios constitue une bonne analogie avec les projections climatiques : **les scénarios du GIEC sont basés sur des choix de société, et la réponse du système climatique est basée sur la science (climatique)**.

NOTE À L'ENSEIGNANT

À QUOI CORRESPONDENT LES PROJECTIONS DU GIEC ?

Les scénarios sont un jeu de valeurs fixées pour les principaux paramètres climatiques. Il existe différentes hypothèses sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (un paramètre clé du climat) au cours des décennies à venir.

Les **trajectoires communes d'évolution socio-économique** (SSP, de l'anglais Shared Socio-economic Pathways) sont des scénarios projetant différents changements socio-économiques mondiaux sur la base de choix de société. Ces scénarios conduisent à différentes projections, des plus optimistes (réduction drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre) aux plus pessimistes (poursuite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre). Cinq de ces scénarios sont présentés ci-dessous.



Anomalies de température mesurées par rapport à la période 1850-1900 (en noir, jusqu'à aujourd'hui) et **cinq projections d'anomalies de température selon différents scénarios du GIEC** (en couleur, d'aujourd'hui à 2100).

Températures mesurées ●
 Projections: ● SSP1-1.9 ● SSP1-2.6 ● SSP2-4.5
 ● SSP3-7.0 ● SSP5-8.5

Les bandes de couleur représentent des plages d'incertitudes : des plages *très probables* autour des projections SSP1-2.6 et SSP3-7.0.

Source : 2021, AR6 du GIEC. Adapté de la Figure SPM.8a « Global surface temperature change relative to 1850-1900 ». Disponible sur le site du GIEC, en anglais (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/summary-for-policy-makers/figure-spm-8/>).

Le nom de chaque scénario renvoie à la fois au niveau d'émissions de gaz à effet de serre et à la trajectoire commune d'évolution socio-économique (SSP) utilisée dans les calculs. Ces scénarios servent de données d'entrée dans les modèles climatiques, qui eux calculent le changement climatique correspondant.

Auparavant, les « profils représentatifs d'évolution de concentration » ou **scénarios RCP** (pour Representative Concentration Pathway), étaient utilisés pour évaluer différents scénarios. Mais contrairement aux SSP, les RCP n'intègrent pas les changements socio-économiques. Il existe néanmoins des similitudes entre les deux, indiquées dans le tableau ci-dessous.

SCÉNARIO SSP	SCÉNARIO CORR. RCP	COMMENTAIRE
● SSP1-1.9	Sans équivalent	Très optimiste
○ SSP1-2.6	RCP2.6	Optimiste
● SSP2-4.5	RCP4.5	Statu quo
● SSP3-7.0	Entre RCP6.0 et RCP8.5	Pessimiste
● SSP5-8.5	RCP8.5	Très pessimiste

2021, AR6 du GIEC, Cross-Chapter Box 1.4. Adapté du tableau 1 : « The SSP scenarios used in this Report ». Disponible sur le site du Giec, en anglais (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-1/ccbox-1-4-figure-1>).

Les scénarios étudiés par le GIEC décrivent des mondes plus chauds très différents. SSP1, par exemple, suppose un monde basé sur le développement durable - c'est le scénario le plus optimiste : forte coopération internationale, développement inclusif, respectueux de l'environnement et du bien-être. Les inégalités sont réduites à la fois entre les pays et au sein même des pays. La consommation est orientée vers une faible croissance matérielle, moins gourmande en ressources et en énergie. Les modèles numériques permettent d'anticiper les changements climatiques futurs en simulant l'évolution du climat dans chaque scénario. On constate par exemple que le scénario SSP1, dans lequel le réchauffement climatique reste en dessous de 1,5 °C, est le seul à remplir les objectifs de l'Accord de Paris.

L'**atlas interactif du GIEC** (en anglais) permet de comparer l'évolution du climat entre deux scénarios, en intégrant plusieurs variables relevant du climat moyen (température moyenne, précipitations totales notamment) et des extrêmes climatiques (nombre de jours au-dessus de 35 °C, par exemple).

FICHE 7.1



TROIS EXEMPLES D'ÉLEVAGES DE BOVINS



Vue d'avion (km)



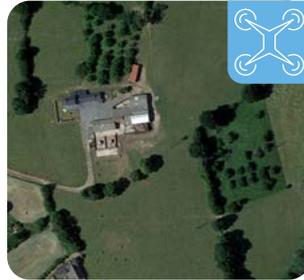
Vue de drone (dm)



Vue piétonne (m)

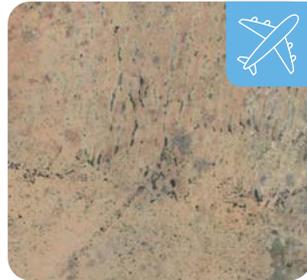
FRANCE : LE BOCAGE NORMAND

La Normandie, en France, a conservé une agriculture à petite échelle, avec des exploitations familiales. Les prairies sont petites et délimitées par des haies formant ce que l'on appelle le bocage. Ce paysage abrite une biodiversité très riche, notamment insectes et oiseaux, qui profitent des nombreux arbres et arbustes. On élève traditionnellement des vaches normandes pour le lait (pour faire du camembert, par exemple), mais aussi pour la viande. Les races de vaches utilisées en France, la Normande et la Holstein (dominante), sont très productives. D'autres sont destinées à la production de viande : la Charolaise, la Limousine et la Corse. Le bétail libère du méthane, un puissant gaz à effet de serre, dans l'atmosphère.



BURKINA FASO : LES ZÉBUS DES PEULS

Les Peuls possèdent de grands troupeaux de zébus, une espèce apparentée aux vaches. Les femelles donnent du lait, et les taureaux ont une bonne force de traction. Leur viande peut être consommée lors d'occasions spéciales. Ces animaux paissent sur de grandes zones très arides et s'abreuvent dans de grands points d'eau créés par l'homme. Les sécheresses intenses et de plus en plus fréquentes liées au changement climatique entraînent des pertes de rendement et augmentent le taux de mortalité des troupeaux. Le bétail émet du méthane, un puissant gaz à effet de serre.



PARAGUAY : LES ÉLEVAGES BOVINS

Au Brésil et au Paraguay, les agriculteurs abattent des forêts pour créer de l'espace afin d'élever des vaches. Celles-ci vivent en groupes denses dans des parcs géants ; leur viande est consommée par la population locale et aussi exportée en dehors d'Amérique du Sud. Les vaches sont les principaux émetteurs de méthane, un important gaz à effet de serre. La déforestation contribue également aux changements climatiques.



DIFFÉRENTS TYPES D'ÉLEVAGES BOVINS DANS LE MONDE

	LIEU / CLIMAT	TYPE D'ÉLEVAGE ET DE PRODUCTION	SUPERFICIE DES TERRES NÉCESSAIRES À L'ÉLEVAGE (PETITE ? LARGE ?)
FRANCE LE BOCAGE NORMAND			
BURKINA FASO LES ZÉBUS DES PEULS			
PARAGUAY LES ÉLEVAGES BOVINS			



PARAMÈTRES DE L'ÉLEVAGE BOVIN (NE COCHER QU'UNE CASE)

JEU DE PARAMÈTRES

MODE D'ÉLEVAGE **INTENSIF, PAS DE STRESS CLIMATIQUE**

L'élevage intensif se caractérise par des rendements très élevés en viande ou en lait : les animaux restent sur de petites surfaces, reçoivent des traitements (ex. antibiotiques), sont nourris avec des fourrages très énergétiques et sont traités à la machine. Ce type d'élevage consomme de grandes quantités d'énergie et de produits (carburant, produits phytosanitaires, engrais), avec un impact considérable sur l'environnement.



JEU DE PARAMÈTRES

MODE D'ÉLEVAGE **ALLONGEMENT DES LACTATIONS, PAS DE STRESS CLIMATIQUE**

Pour qu'une vache produise du lait, elle doit donner naissance à un veau. 40 à 50 semaines (en moyenne) après la naissance du veau, la vache ne produit plus de lait et le producteur ne gagne plus d'argent, une nouvelle insémination est ainsi rapidement programmée. Les organisations de protection animale et certains éleveurs recommandent de laisser les vaches se reposer entre les portées («allongement des lactations»).



JEU DE PARAMÈTRES

MODE D'ÉLEVAGE **AGRICULTURE BIOLOGIQUE, PAS DE STRESS CLIMATIQUE**



L'agriculture biologique n'utilise que des engrais organiques. Elle implique souvent une lutte biologique contre les parasites (à l'aide d'insectes prédateurs, par exemple) et un système de polyculture. Dans l'agriculture biologique, les produits de synthèse sont interdits ou strictement limités. Elle est plus durable.

JEU DE PARAMÈTRES

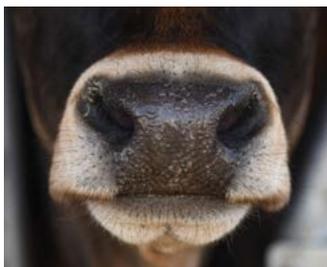
MODE D'ÉLEVAGE « **AGRICULTURE DURABLE** », PAS DE STRESS CLIMATIQUE

Proches d'un modèle extensif, les «exploitations durables» se caractérisent par un système de production autonome et économiquement autosuffisant, basé sur le pâturage. Les animaux passent plus de temps à l'extérieur et disposent de plus d'espace, et ceux-ci sont traités avec moins d'engrais et de produits chimiques que dans l'agriculture conventionnelle. Ce type d'agriculture vise à être plus respectueuse de la biodiversité.



JEU DE PARAMÈTRES

MODE D'ÉLEVAGE **STRESS CLIMATIQUE : TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ ÉLEVÉES**

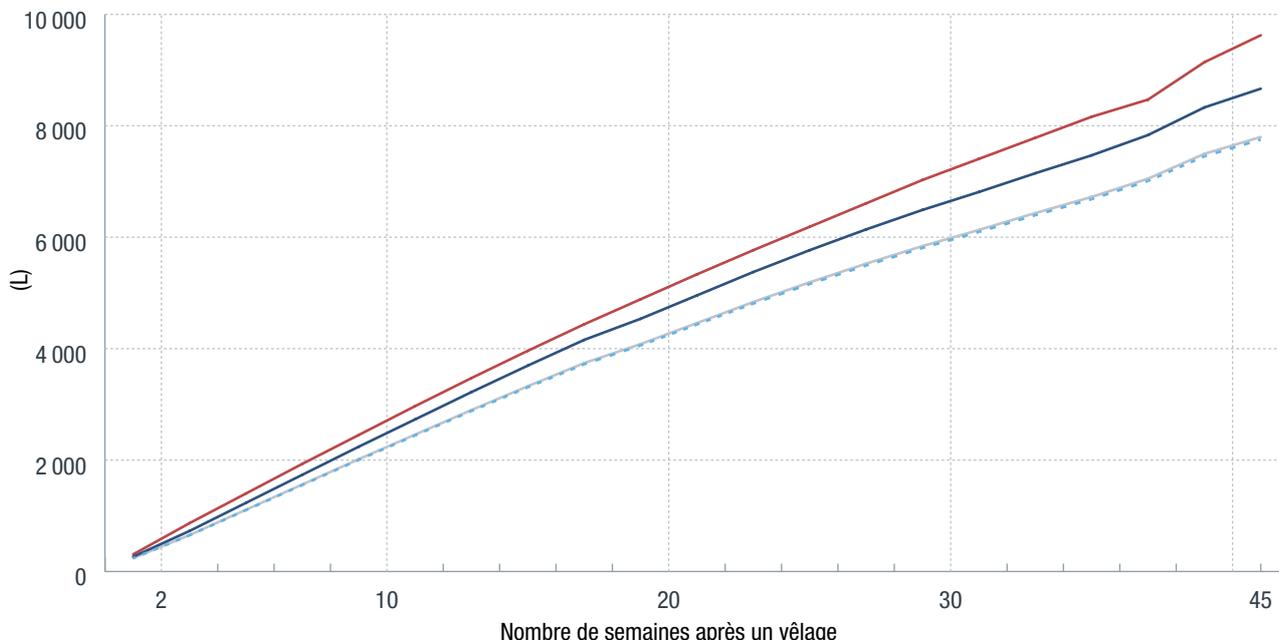


À des fins expérimentales, il est possible de modifier la température et l'humidité d'une étable de manière à générer du stress chez les vaches : il s'agit de simuler une vague de chaleur pour voir comment celle-ci affecte la production agricole.



COURBES DE PRODUCTION LAITIÈRE CUMULÉE APRÈS LA NAISSANCE D'UN VEAU

- Question 1.** Tracer, en vert, la courbe correspondant à la production laitière cumulée (L) de la «race Holstein, agriculture biologique, sans stress climatique».
- Question 2.** Trouver la production totale (en L) à la fin de cette période de production laitière par une vache après un vêlage : il s'agit d'une projection (de production de lait).
- Question 3.** Évaluer le scénario le plus productif (celui dont la projection est la plus élevée). Évaluez votre propre scénario par rapport à d'autres, en fonction de différents aspects (projection de production laitière, critères éthiques, écologiques, etc.).

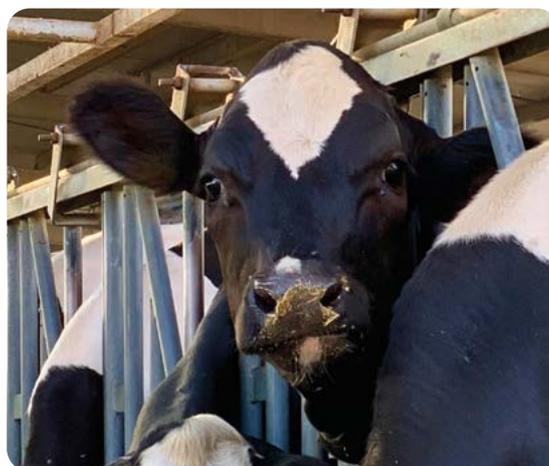


- Production laitière (L) race Holstein, sans stress climatique
- Production laitière (L) Race Holstein, sans stress climatique, agriculture durable
- Production laitière (L) race Holstein, stress climatique
- Production laitière (L) Race Holstein, sans stress climatique, allongement des lactations.

Lait collecté tous les quinze jours auprès d'une vache (en litres cumulés)

Nombre de semaines après un vêlage																				
2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	42	45
● Production laitière cumulée (L) Race Holstein, agriculture biologique, sans stress climatique																				
197	539	912	1,285	1,658	2,020	2,383	2,735	3,077	3,357	3,667	3,978	4,268	4,544	4,803	5,041	5,290	5,528	5,797	6,164	6,413

Données tirées de :
 2013, Brocard et al, «Conséquences techniques et économiques de l'allongement à 18 mois de l'intervalle entre vêlages chez les vaches laitières, 3R», (https://uploads-ssl.webflow.com/6135efc5e59d238060fe5710/61c346373c5fcc91cc3898c9_2021_Conduite_TVZ_allongement%20des%20lactations.pdf)
 Les données complémentaires sont extrapolées à partir de la baisse de production laitière extraite de : 2019, L'observatoire technico-économique des systèmes bovins laitiers du réseau CIVAM, «Comparaison des performances des exploitations d'élevage herbivore en Agriculture Durable avec celles du RICA» (<https://www.civam.org/ressources/reseau-civam/agriculture-durable-thmatique/observatoire-technico-economique-des-systemes-bovins-laitiers-2021/>)
 2023, S. Mattalia et al, «Quels sont les effets du réchauffement climatique sur les performances des vaches laitières ?», (<https://idele.fr/detail-article/quels-sont-les-effets-du-rechauffement-climatique-sur-les-performances-des-vaches-laitieres>)



Race Holstein.

PRODUCTION LAITIÈRE CUMULÉE EN FONCTION DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES

- Question 1.** Téléchargez le tableau et calculez la production cumulée de lait depuis la naissance du veau. Notez ces valeurs dans un nouveau tableau.
- Question 2.** Tracez les courbes correspondant à chaque scénario. Donnez un titre à votre graphique et, pour chaque scénario, déterminez la projection laitière cumulée à la semaine 45.
- Question 3.** Définissez ce qu'est une « projection de production laitière ».
- Question 4.** Évaluez le scénario le plus productif (celui dont la projection est la plus élevée). Comparez votre propre scénario aux autres, en fonction de différents aspects (projection de production laitière, critères éthiques, écologiques, etc.).

Lait collecté tous les quinze jours auprès d'une vache (en litres cumulés)

Nombre de semaines après la naissance d'un veau		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	42	45
●	Production laitière (L) Race Holstein, sans stress climatique	378	350	504	504	504	490	490	476	462	378	420	420	392	372	350	322	336	322	364	496	336
●	Production laitière (L) Race Holstein, allongement des lactations, pas de stress climatique	378	490	532	532	518	518	504	490	476	448	448	434	420	420	420	378	378	378	308	672	483
●	Production laitière (kg/l) Race Holstein, sous stress climatique	340	315	454	454	454	441	441	428	416	340	378	378	353	335	315	290	302	290	328	446	302
●	Production laitière (kg/l) Race Holstein, sans stress climatique, agriculture durable	338	313	451	451	451	438	438	426	413	338	376	376	351	333	313	288	301	288	326	444	301
●	Production laitière (kg/l) Race Holstein, agriculture biologique, sans stress climatique	280	259	373	373	373	363	363	352	342	280	311	311	290	275	259	238	249	238	269	367	249

Données tirées de :
 2013, Brocard et al, « Conséquences techniques et économiques de l'allongement à 18 mois de l'intervalle entre vêlages chez les vaches laitières, 3R », (https://uploads-ssl.webflow.com/6135efc5e59d238060fe5710/61c346373c5fcc91cc3898c9_2021_Conduite_TVZ_allongement%20des%20lactations.pdf)

Des données supplémentaires sont extrapolées à partir de la diminution de la production laitière extraite de :
 2019, L'observatoire technico-économique des systèmes bovins laitiers du réseau CIVAM, « Comparaison des performances des exploitations d'élevage herbivore en Agriculture Durable avec celles du RICA » (<https://www.civam.org/ressources/reseau-civam/agriculture-durable-thmatique/observatoire-technico-economique-des-systemes-bovins-laitiers-2021/>)
 2023, S. Mattalia et al, « Quels sont les effets du réchauffement climatique sur les performances des vaches laitières ? », (<https://idele.fr/detail-article/quels-sont-les-effets-du-rechauffement-climatique-sur-les-performances-des-vaches-laitieres>)



Une vache et son veau.

SÉANCE 8 LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS (ICU)

DISCIPLINES CONCERNÉES
Physique-Chimie
Géographie
SVT

DURÉE
Préparation : 10 min
Activité : 3 h
(2 séances d'1h30)
Conclusion : 20 min

TRANCHE D'ÂGE
Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE
Analyse documentaire
Animation multimédia

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

À l'aide d'une animation multimédia, les élèves comprennent ce que sont les îlots de chaleur urbains. Ils font la différence entre les scénarios d'atténuation et d'adaptation, et entre les compromis et synergies. Certaines solutions pour faire face à l'effet ICU permettent la réalisation de plusieurs objectifs de développement durable.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 3 – Envisager des avenir durables
Compétence ciblée – 3.2 Adaptabilité

**CONCEPTS ABORDÉS**

Accord de Paris, anomalies de température, îlot de chaleur urbain (ICU), adaptation, atténuation, objectifs de développement durable (ODD), choix de société, projection climatique, solutions de rafraîchissement urbain, maladaptation.

PRÉPARATION 10 MIN

Cette leçon se divise en **deux activités d'une heure et demie**, chacune correspondant à une partie de l'animation multimédia. Les deux parties sont liées, mais vous pouvez les étudier en deux temps avec vos élèves.

Matériel commun nécessaire aux deux activités : ordinateur, connexion internet ou animation multimédia installée sur chaque ordinateur, vidéoprojecteur.

**→ CONSEIL À L'ENSEIGNANT**

Toutes les références scientifiques utilisées dans cette animation, qui est basée sur des données provenant de modèles climatiques réels, sont disponibles [ici](#).

INTRODUCTION

Dans la séquence A, les élèves ont vu que les humains sont responsables du changement climatique actuel causé par les grandes quantités de gaz à effet de serre qu'ils émettent dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle.

Les principaux objectifs d'apprentissage abordés dans cette leçon sont les suivants :

- Sans solution d'atténuation, la température globale de la Terre continuera d'augmenter au-delà de la limite fixée par l'Accord de Paris.
- L'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) correspond à une anomalie de température positive mesurée dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes.

- La mise en œuvre de solutions d'adaptation dès aujourd'hui peut réduire cet effet.
- La mise en œuvre de solutions (atténuation, adaptation) pour faire face à cet effet peut également limiter l'augmentation de la température d'ici la fin du siècle ; on parle de synergies.
- Certaines solutions mises en œuvre aujourd'hui pour leur efficacité peuvent s'avérer moins efficaces à l'avenir ; on parle de maladaptation.
- La question de l'effet ICU est étroitement liée à un certain nombre d'objectifs de développement durable (ODD), et certaines solutions pour faire face à l'effet ICU permettent la réalisation de plusieurs ODD.

ACTIVITÉ 1 1H30**PARTIE 1: DÉBUTER AVEC L'ANIMATION 25MIN**

1. Les élèves se familiarisent avec l'animation. Pour les guider, demandez-leur quels pourraient être les objectifs de cette animation dans le contexte de l'étude du changement climatique.

2. Ensemble, récapituler brièvement ce qu'ils ont fait, pourquoi et comment utiliser l'animation.

PARTIE 2: LIMITER LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL À 1,5 °C 55MIN

3. Les élèves travaillent en petits groupes de 2 ou 3. Expliquez-leur quelle est leur « mission » : limiter l'augmentation de la température en 2100 sous le seuil fixé par l'Accord de Paris (environ +1,5 °C de réchauffement par rapport à l'époque 1850-1900). Laissez-les chercher sur internet la signification du logo à côté du thermo-



mètre planétaire. Demandez-leur si la couleur du logo a changé après la mise en œuvre de leurs solutions et quelle pourrait être la signification de ce changement de couleur. *C'est le logo de la COP21 qui est affiché : il est vert lorsque l'Accord de Paris est respecté, rouge lorsque la température est trop élevée.*

4. Discussion : Chaque groupe peut présenter sa (ses) solution(s) et en discuter la faisabilité en termes de coût, d'implications culturelles et éthiques ou d'échelle d'action (individuelle, locale et/ou collective).

PARTIE 3: CONCLUSION 10MIN

Il existe plusieurs moyens de rester en dessous de +1,5 °C à la fin du siècle !

5. Demandez-leur ce que signifie "l'atténuation" et pourquoi c'est une notion importante.

6. Ensuite, demandez-leur s'il est possible de respecter l'Accord de Paris en faisant des efforts dans un seul secteur uniquement. La transformation de **tous les secteurs** de notre société est nécessaire (introduisez éventuellement le terme de **transformation systémique**).

7. **Facultatif** (s'il reste du temps) : divisez la classe en deux groupes, l'un devant trouver la meilleure combinaison pour atteindre la plus faible augmentation de température d'ici 2100, l'autre devant trouver une combinaison pour atteindre la plus forte augmentation de température à la fin du siècle !

ACTIVITÉ 2 1H30

Pour cette partie, imprimez et utilisez les **FICHES 8.1** et **8.2** pour chaque binôme.

PARTIE 1: SOLUTIONS POUR FAIRE FACE À L'EFFET ICU EN 2020 45MIN

1. **Point de départ : discussions collectives :**
1) *Qu'est-ce que l'ICU ?* D'après ce qu'ils peuvent deviner ou ce qu'ils ont vu sur les réseaux sociaux ou à la télévision, les élèves devraient citer la différence de température entre les villes et la campagne. 2) *Comment expliquer cette anomalie de température dans les villes ?* Les élèves proposent des hypothèses pour répondre à cette question.

2. Puis chaque groupe (deux élèves par groupe, l'un sélectionnant et cliquant sur les options, l'autre vérifiant l'impact sur la ville et les niveaux de température) choisit une ville pour débiter, ou prend celle que vous leur donnez.

Les élèves utilisent d'abord l'animation réglée sur 2020 (ils doivent observer une anomalie de température positive dans les villes par rapport à la température de la campagne).

- Ils se concentrent sur une ou deux villes.
- Pour chaque ville, ils doivent **présenter et mettre en œuvre diverses solutions dans différents**

secteurs (bâtiment, agriculture, mobilité, énergie, urbanisme et nature) afin de réduire l'ICU représenté par l'anomalie de température dans l'animation.

- Chaque groupe présente au reste de la classe le contexte local avant de tester son scénario d'adaptation dans la ville explorée, avec différentes solutions permettant de réduire l'ICU (la présentation de certaines solutions sans effet peut également être intéressante).



Élèves utilisant l'animation multimédia sur les îlots de chaleur urbain.

La classe arrive à la conclusion qu'il existe des solutions qui peuvent être mises en œuvre dès aujourd'hui pour minimiser l'effet d'ICU.

3. Demandez aux élèves de remplir le tableau de la FICHE 8.1 et d'évaluer la **faisabilité des solutions** qu'ils ont trouvées (sur le plan économique, culturel, technique, etc.). Ils doivent aussi établir des liens entre ces solutions visant à réduire l'îlot de chaleur urbain d'une part, et certains des 17 ODD d'autre part (disponibles sur ce site web : <https://sdgs.un.org/fr/goals> ou sur la FICHE 8.2).

PARTIE 2: SOLUTIONS POUR FAIRE FACE À L'EFFET ICU EN 2100 45MIN

L'idée générale de cette partie est de se focaliser sur les changements à l'horizon 2100 en termes de température et d'îlots de chaleur urbains.

1. Commencez par demander aux élèves quelle sera, selon eux, l'évolution de ces deux paramètres (température à la campagne et anomalie de température urbaine) d'ici la fin du siècle et pourquoi.

2. Les élèves réinitialisent l'animation (en cliquant sur la flèche «en boucle»), cliquent sur 2100, puis zooment sur la (les) ville(s) qu'ils ont déjà étudiée(s). Tout d'abord, dans de nombreux cas, ils observeront une augmentation de la température globale (représentée par la température de la campagne) entre 2020 et 2100, comme conséquence du réchauffement climatique avec un ICU constant. Cela signifie que même si l'effet ICU n'augmente pas, les zones urbaines se réchaufferont en raison du changement climatique.

3. Ils appliquent ensuite toutes les solutions qu'ils ont précédemment sélectionnées pour l'étude de cas de 2020. Ils observent que l'ICU diminue effectivement, mais deux variations peuvent survenir :

d'une part, il arrive que l'ICU ne diminue pas de la même manière que dans la simulation de 2020 ; d'autre part, l'application des solutions de rafraîchissement urbain peut également avoir un impact sur la température à la campagne (une pierre deux coups).

4. Leur objectif est donc de trouver quelles solutions de rafraîchissement urbain ont un impact (bénéfique ou aggravant) sur le changement climatique. Introduire le terme de «**synergie**» pour décrire le phénomène où une solution a un impact bénéfique à la fois sur la température de la ville (adaptation au changement climatique) et sur celle de la campagne (atténuation globale).

5. Encouragez les élèves à établir des liens entre les solutions qu'ils ont trouvées pour réduire la température de la ville et certains des 17 Objectifs de Développement Durable.

Dans cette dernière section, guidez les élèves à travers un exemple illustrant le fait que certaines solutions de rafraîchissement efficaces mises en œuvre en 2020 pour réduire l'ICU ne le sont plus en 2100. Dans l'animation multimédia, utilisez l'exemple de Moradabad en Inde avec la mise en place de «toits verts et secs» (aller à bâtiment > toits) en 2020 et 2100.

6. Demandez-leur de remplir collectivement le tableau suivant.

	AVANT L'INSTALLATION DES TOITS VERTS ET SECS	APRÈS L'INSTALLATION DES TOITS VERTS ET SECS	EFFICACITÉ DE CETTE SOLUTION SUR L'ICU
ANOMALIE DE TEMPÉRATURE EN VILLE EN 2020 (°C)	+2.84	+2.32	++ 
ANOMALIE DE TEMPÉRATURE EN VILLE EN 2100 (°C)	+2,94	+2.89	+/- 

Cette installation représente actuellement une solution intéressante et efficace d'adaptation puisqu'elle réduit l'effet d'ICU. Cependant, si l'on regarde l'anomalie de température dans la ville d'ici la fin du siècle, on constate que cette température baisse finalement peu après l'installation des toits verts en 2100. En d'autres termes, l'effet de «rafraîchissement» est bien moins important en 2100. Il s'agit d'un bon exemple pour illustrer une **maladaptation** (c'est-à-dire des solutions à court terme qui ne sont plus si efficaces à l'avenir).

7. La mise en œuvre de la plupart des solutions mentionnées précédemment permet de mettre en œuvre les Objectifs de Développement Durable de l'ONU. Remplissez ce tableau de manière collégiale pour récapituler les différentes solutions que vous avez mises en œuvre dans la ville de votre choix afin de réduire l'effet d'ICU et/ou le réchauffement climatique d'ici 2100.

➔ **CONSEIL À L'ENSEIGNANT (QUESTION 6)**

L'effet de rafraîchissement des sols végétalisés provient de l'évapotranspiration des plantes. Or, cette dernière est très faible pour les plantes adaptées à un climat aride. Le changement climatique va modifier le climat de Moradabad, qui passera de subtropical humide à semi-aride : l'évapotranspiration des plantes adaptées à un climat sec étant inférieure, les toits, même végétalisés, se comporteront comme une surface de sol nu. Pour que cette solution de lutte contre les îlots de chaleur urbain soit efficace, il faudrait irriguer pour laisser place à un autre type de végétation. Mais l'ajout d'un système d'irrigation est coûteux et techniquement compliqué ; de plus, il semble inutile en 2020 dans les climats encore humides. C'est pourquoi, en Inde, les toits verts et non irrigués ne sont qu'une solution d'adaptation à court terme. C'est ce que l'on appelle la maladaptation : la solution perd de son efficacité avec le temps.

EXEMPLE DE TABLEAU POUR CLASSER LES SOLUTIONS PROPOSÉES PAR LES ÉLÈVES ET LES LIENS QUI PEUVENT ÊTRE FAITS AVEC LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

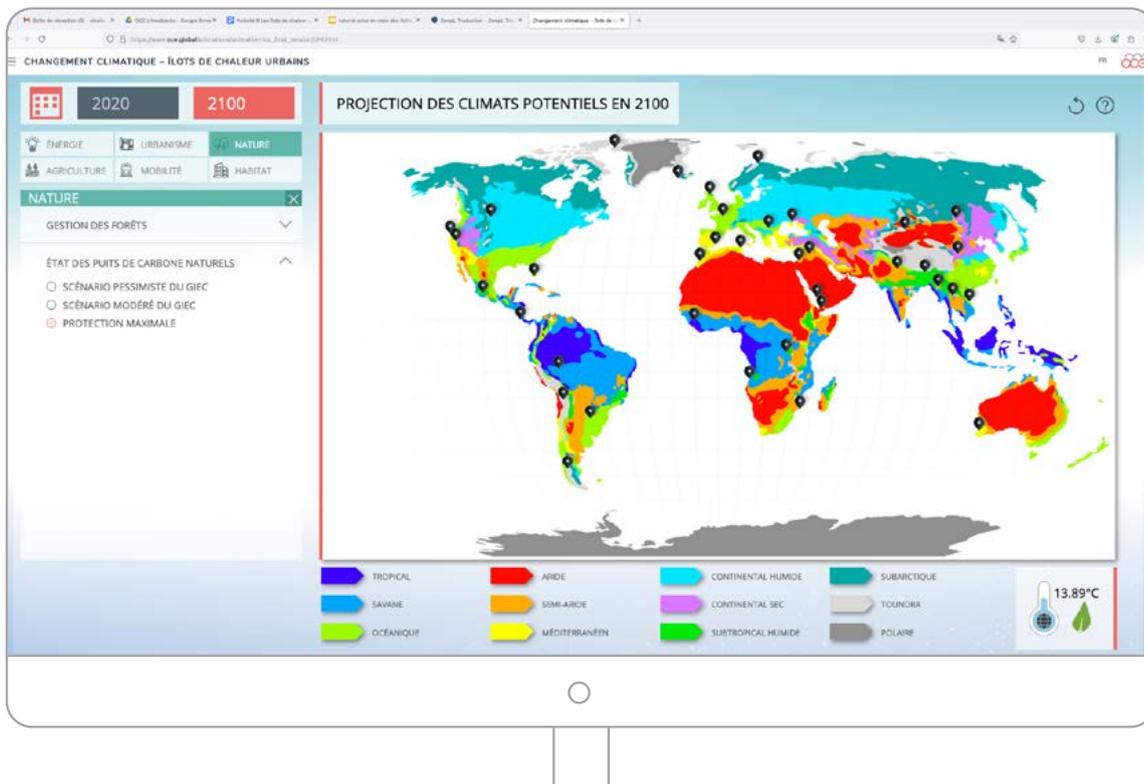
SOLUTION Capteurs solaires thermiques sur les toits

ÉCHELLE D'ACTION	<input checked="" type="checkbox"/> Individu <input type="checkbox"/> Collectif : Ville <input type="checkbox"/> Collectif : Pays	SYNERGIES ENTRE ADAPTATION ET ATTÉNUATION
AGIT SUR	EN 2020 SUR <input checked="" type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) POUR 2100 SUR <input checked="" type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) <input checked="" type="checkbox"/> Réchauffement global (atténuation)	
		<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

MISE EN ŒUVRE DES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE PAR CETTE SOLUTION

ODD N°: 7		ODD N°: 11		ODD N°:	SYNERGIES ENTRE LA SOLUTION ET LES ODD
DÉTAIL : Énergie propre et abordable		DÉTAIL : Villes et communautés durables		DÉTAIL :	
					<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

CAPTURES D'ÉCRAN DE L'ANIMATION MULTIMÉDIA SUR L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN :



Les élèves voient une carte du climat mondial en 2100 et la température moyenne de la planète. Ils ont choisi une série de solutions d'atténuation (y compris la préservation des puits de carbone naturels, ainsi que des solutions dans d'autres secteurs). Voici donc la projection climatique : 13,89 °C. Ils ont réussi à limiter le réchauffement climatique d'ici la fin du siècle à un niveau bien inférieur à +1,5 °C (l'Accord de Paris est respecté : le petit logo est vert).



Moradabad, 2020. Ici, les élèves étudient une ville indienne, Moradabad. Ils ont choisi de végétaliser les toits pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain (solution d'adaptation : « Toits verts et secs »).



Moradabad, 2100. Maintenant, les élèves voient le résultat de la même solution d'adaptation dans cette ville à la fin du siècle. Ils peuvent constater que l'installation de toits verts et secs pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain est beaucoup moins efficace.

CONCLUSION 20 MIN



Pour conclure cette activité, les élèves peuvent aller à la partie « Conclusion » de l'animation en cliquant sur l'icône en forme de bloc-note dans le coin supérieur droit de l'écran. Cela les aidera à résumer ce qu'ils ont vu, c'est-à-dire :

1) Certaines solutions peuvent être mises en œuvre à l'échelle mondiale pour limiter le réchauffement climatique ; cela nécessitera des efforts plus importants dans **tous les secteurs et à tous les niveaux (individuel et collectif)**, mais nous pouvons encore parvenir à respecter l'Accord de Paris.

2) Des **solutions de rafraîchissement urbain** peuvent être mises en œuvre au niveau local en 2020 pour réduire l'ICU à court terme ; sélectionner soigneusement ces solutions et modéliser leur efficacité dans le futur permettra d'éviter les **maladaptations**. En outre, certaines de ces solutions locales peuvent également contribuer à réduire le réchauffement climatique d'ici 2100 : c'est ce que l'on appelle une **synergie entre les stratégies d'adaptation et d'atténuation**.

NOTE À L'ENSEIGNANT

Dans cette session, différentes notions scientifiques sont invoquées :

Sans solution d'atténuation, la **température globale** de la Terre continuera d'augmenter au-delà de la limite fixée par l'Accord de Paris en 2015.

Lors de la COP21 en 2015, 194 pays se sont mis d'accord pour limiter le réchauffement climatique en dessous de +1,5 °C par rapport à l'ère pré-industrielle. Le seul moyen de rester en dessous de cette limite est de réduire nos émissions de gaz à effet de serre et de parvenir à des émissions nettes nulles de CO₂ d'ici 2050 (on parle de zéro émission nette).

L'**effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) correspond à une anomalie de température positive** mesurée dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes.

Cet effet correspond à des températures plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones rurales périphériques. Il résulte principalement de la densité de population plus élevée qui influencera à la fois la production de chaleur par les activités humaines et l'artificialisation des sols qui limitera la couverture végétale. L'ICU est **indépendant** du réchauffement climatique, l'un des premiers cas ayant été mesuré en 1820 par Luke Howard à Londres. Cependant, même s'il n'y est pas directement lié, le **réchauffement climatique amplifie** l'ICU en augmentant la température globale et en aggravant la dangerosité causée par la chaleur accrue en ville. Étant donné que la population urbaine devrait doubler d'ici la fin du siècle, des solutions de « **rafraîchissement urbain** » doivent être mises en œuvre pour atténuer l'ICU. Cependant, en raison de la complexité de la géométrie urbaine aux différentes échelles, il est nécessaire d'utiliser des modèles pour établir des projections sur l'efficacité de telle ou telle solution.

La mise en œuvre dès aujourd'hui de **solutions d'adaptation peut réduire l'effet d'ICU**.

Ces solutions visent à réduire l'impact de l'effet d'ICU sur la population dans les zones urbaines et à refroidir les villes en réduisant l'émission et/ou le piégeage de la chaleur (ex : plantation d'arbres, toits verts, changement dans la façon de planifier et de concevoir le bâti, etc.).

La mise en œuvre de solutions pour faire face à l'effet d'ICU peut également limiter l'augmentation de la température globale d'ici la fin du siècle : on parle de synergies entre adaptation et atténuation.

Ainsi, certaines solutions d'adaptation mises en œuvre localement pour faire face au problème de l'ICU dans les villes à court terme peuvent parfois également limiter l'augmentation de la température globale d'ici 2100 (représentée dans l'animation par la température de la campagne environnante). Ces dernières solutions d'adaptation peuvent donc également être considérées comme des solutions d'atténuation : on peut parler de synergies entre les deux.

Inversement, d'autres solutions mises en œuvre aujourd'hui pour leur efficacité peuvent s'avérer moins efficaces, voire inefficaces, à l'avenir : on parle alors de **maladaptation**.

Typiquement, les solutions « vertes » (reposant sur la végétalisation de surfaces artificielles et/ou la plantation d'arbres) dépendent fortement du climat local. Toutes les essences d'arbres ne pourront pas survivre à toutes les conditions futures. Ainsi, les solutions de rafraîchissement urbain doivent être évaluées en fonction de leur efficacité dans le climat actuel et de leur efficacité potentielle dans un climat futur.

La question de l'effet d'ICU est étroitement liée aux objectifs de développement durable (ODD) : certaines solutions pour faire face à cet effet facilitent la mise en œuvre des ODD.

En 2015, les membres des Nations Unies ont adopté 17 objectifs de développement durable (ODD) pour agir dans le cadre d'un partenariat mondial visant notamment à mettre fin à la pauvreté, à améliorer la santé et l'éducation, ou encore à réduire les inégalités, tout en prenant des mesures pour lutter contre le changement climatique. Certaines actions visant à réduire l'effet d'ICU s'inscrivent également dans le cadre de certains des ODD : par exemple, encourager le développement des transports publics est aussi conforme à l'ODD 10 (réduction des inégalités) et à l'ODD 11 (villes et communautés durables).

POUR ALLER PLUS LOIN (FACULTATIF)

L'animation représente à l'échelle mondiale l'évolution des zones climatiques d'ici à 2100, selon différents scénarios.

Vous pouvez proposer à vos élèves une activité spécifique sur la façon dont ces changements pourraient affecter les différents écosystèmes. Pour cela, vous pouvez vous inspirer des activités du manuel de l'OCE « Changement climatique et terres émergées » de la série « Le Climat entre nos mains » (voir les séances C2 ou C4).

Demandez aux élèves d'associer chaque zone climatique à des plantes et des espèces animales adaptées, mais aussi à des peuples autochtones. Demandez-leur de réfléchir aux effets de tels changements climatiques et d'évaluer leurs impacts sur les populations humaines et les écosystèmes.

FICHE 8.1



DES SOLUTIONS POUR MA VILLE

→ Remplissez ces tableaux pour récapituler les différentes solutions que vous avez mises en œuvre dans la ville de votre choix afin de réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) et/ou le réchauffement climatique d'ici 2100. La mise en œuvre de solutions pour faire face à l'effet d'ICU peut également limiter l'augmentation de la température d'ici la fin du siècle ; on parle alors de synergies (cela revient à « faire d'une pierre deux coups »). Cochez la case « synergies » si c'est le cas. Enfin, indiquez les ODD atteints grâce à la mise en œuvre de cette solution.

SOLUTION

ÉCHELLE D'ACTION	<input type="checkbox"/> Individu <input type="checkbox"/> Collectif : Ville <input type="checkbox"/> Collectif : Pays	SYNERGIES ENTRE ADAPTATION ET ATTÉNUATION
AGIT SUR	EN 2020 SUR <input type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) POUR 2100 SUR <input type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) <input type="checkbox"/> Réchauffement global (atténuation)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

MISE EN ŒUVRE DES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE PAR CETTE SOLUTION

ODD N°:	ODD N°:	ODD N°:	SYNERGIES ENTRE LA SOLUTION ET LES ODD
DÉTAIL :	DÉTAIL :	DÉTAIL :	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non		
ODD N°:	ODD N°:	ODD N°:	SYNERGIES ENTRE LA SOLUTION ET LES ODD
DÉTAIL :	DÉTAIL :	DÉTAIL :	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non		

SOLUTION

ÉCHELLE D'ACTION	<input type="checkbox"/> Individu <input type="checkbox"/> Collectif : Ville <input type="checkbox"/> Collectif : Pays	SYNERGIES ENTRE ADAPTATION ET ATTÉNUATION
AGIT SUR	EN 2020 SUR <input type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) POUR 2100 SUR <input type="checkbox"/> Îlot de chaleur urbain (adaptation) <input type="checkbox"/> Réchauffement global (atténuation)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non

MISE EN ŒUVRE DES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE PAR CETTE SOLUTION

ODD N°:	ODD N°:	ODD N°:	SYNERGIES ENTRE LA SOLUTION ET LES ODD
DÉTAIL :	DÉTAIL :	DÉTAIL :	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non		
ODD N°:	ODD N°:	ODD N°:	SYNERGIES ENTRE LA SOLUTION ET LES ODD
DÉTAIL :	DÉTAIL :	DÉTAIL :	
<input type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non		



LISTE DES 17 OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD)



La lutte contre les changements climatiques est l'un des aspects du Développement Durable.

Approuvé en 2015 par les 193 États membres des Nations unies, l'Agenda 2030 pour le développement durable fixe des objectifs pour répondre aux défis sociétaux internationaux. Il s'agit notamment de 17 Objectifs de développement durable (ODD), qui visent à assurer une transition écologique et inclusive tout en éradiquant la pauvreté et les inégalités.

La lutte contre les changements climatiques est explicite dans l'ODD 13. Les autres ODD encouragent tous la mise en œuvre d'actions qui contribueront également à la lutte contre le changement climatique, dans le but de transformer la société dans son ensemble.



1 PAS DE PAUVRETÉ
Réduire la vulnérabilité des populations les plus pauvres face aux conséquences des changements climatiques.



2 FAIM «ZÉRO»
Développer une agriculture bas-carbone et résiliente aux aléas climatiques pour assurer la sécurité alimentaire.



3 BONNE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE
 limiter la propagation des maladies à vecteurs et celles causées par la pollution.



4 ÉDUCATION DE QUALITÉ
Introduire les enjeux de préservation du climat dans les cursus éducatifs des générations futures.



5 ÉGALITÉ ENTRE LES SEXES
Valoriser le rôle des femmes dans la lutte contre le changement climatique et les impliquer dans les décisions politiques locales.



6 EAU PROPRE ET ASSAINISSEMENT
 limiter les impacts sur les services d'assainissement et les menaces sur les ressources en eau.



7 ÉNERGIE PROPRE ET D'UN CÔTÉ ABORDABLE
Promouvoir la sobriété, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables.



8 TRAVAIL DÉCENT ET CROISSANCE ÉCONOMIQUE
Engager la transition vers une économie bas-carbone créatrice d'emplois et basée sur une croissance durable.



9 INDUSTRIE, INNOVATION ET INFRASTRUCTURE
Promouvoir la transformation de l'industrie par l'innovation technologique bas-carbone.



10 INÉGALITÉS RÉDUITES
Inclure l'équité et la justice dans la lutte contre les changements climatiques.



11 VILLES ET COMMUNAUTÉS DURABLES
Favoriser le développement de villes sobres en carbone, résilientes et favorisant les transports en commun.



12 CONSOMMATION ET PRODUCTION RESPONSABLES
Adopter une consommation sobre et favoriser une économie circulaire respectueuse du climat.



13 MESURES RELATIVES À LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
Prendre les mesures d'urgence pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions.



14 VIE AQUATIQUE
Préserver les océans pour renforcer leurs rôles de puits de carbone et de régulateurs du climat.



15 VIE TERRESTRE
Préserver les écosystèmes forestiers, leur biodiversité et augmenter le stockage de carbone par les sols.



16 PAIX, JUSTICE ET INSTITUTIONS EFFICACES
Atténuer les changements climatiques pour réduire le nombre de déplacés climatiques et limiter les tensions géopolitiques.



17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS
Mobiliser les États, les entreprises et la société civile pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat.

SÉANCE 9 LITTÉRATIE DES FUTURS

DISCIPLINES
CONCERNÉESLittérature
Arts visuels
Théâtre
SVT

DURÉE

Préparation : 10 min
Activité : 2h

TRANCHE D'ÂGE

Élèves de plus de 15 ans

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

Atelier d'écriture
Activité créative

OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

Les élèves reviennent sur le concept de scénarios vu dans les séances précédentes. Ils imaginent des futurs possibles dans un monde sous contrainte climatique. Ils peuvent traduire ces histoires en œuvres d'art, en exposition, en roman, etc. C'est une bonne occasion de se projeter dans le futur d'une manière positive et créative.

COMPÉTENCE CIBLÉE

Domaine 3 – Envisager des futurs durables
Compétence – 3.1 Littératie des futurs



CONCEPTS ABORDÉS

Scénario, choix de société, projections climatiques, effet d'îlot de chaleur urbain, adaptation, atténuation

PRÉPARATION 10 MIN

- Ordinateur et matériel de projection pour montrer la **FICHE 9.1**.
- **FICHE 9.2** imprimée pour chaque groupe d'élèves.
- Fournitures d'arts visuels (stylos, peinture, crayons ou matériel informatique de votre choix).
- Reportez-vous à la **FICHE 8.1** remplie au cours de la séance précédente.

INTRODUCTION 30 MIN

En guise d'introduction, demandez aux élèves de rappeler quelle sera la température globale en 2100. Après ce qu'ils ont appris, ils répondront probablement qu'il y a différentes projections possibles, selon le scénario décidé par la société (séance 7). Mais la trajectoire actuelle nous mène à une température globale moyenne de 15,32°C à la fin du siècle, au delà de l'Accord de Paris.

Présentez la **FICHE 9.1**, un croquis réalisé par des élèves illustrant la vie dans une ville en 2042. Demandez aux élèves de citer quelques-uns des choix d'adaptation ou d'atténuation qui ont été faits dans cette ville pour lutter contre les changements climatiques. Vous pouvez leur rappeler le contenu de l'animation multimédia utilisée dans la **Séance 8**.

Réponses attendues : «*On peut voir une mobilité respectueuse de l'environnement (pas de voitures visibles), beaucoup d'arbres, des fermes urbaines, etc.*»

Demandez aux élèves de montrer des indices d'une vague de chaleur vécue par les habitants.

«*Les habitants transpirent, ils ont chaud et leurs visages sont rouges*». Les élèves vont imaginer la vie de ces habitants soumis au stress climatique.

DÉROULEMENT 1H20

PARTIE 1: S'INSPIRER D'UNE PRODUCTION ARTISTIQUE

40 MIN

1. Distribuez la **FICHE 9.2** et demandez aux élèves de lire les trois témoignages de résidents. Ils feront correspondre chaque témoignage à une figure de **FICHE 9.1**.
2. Demandez aux élèves d'imaginer un nouveau personnage. Ils doivent décrire une de ses journées dans sa ville. Vous pouvez travailler des compétences artistiques, littéraires ou théâtrales de vos élèves et utiliser la grille de la page suivante pour les évaluer.

NOTE À L'ENSEIGNANT

UN EXERCICE D'ÉCRITURE DE L'AVENIR POUR SURMONTER L'ÉCO-ANXIÉTÉ

De nombreuses études internationales montrent que l'éco-anxiété touche de plus en plus les jeunes, dès l'école maternelle. Cet affect est lié à l'anticipation de changements rapides et spectaculaires dans l'environnement et aux conséquences catastrophiques des événements extrêmes, souvent associés à une peur de l'avenir. La prise en compte de cette dimension affective est essentielle à une éducation au climat de qualité. Les auteurs recommandent que, pour faire face à l'éco-anxiété, les éducateurs eux-mêmes aient conscience de leurs propres émotions face aux changements climatiques¹. Il est également important de rappeler aux élèves que toute émotion, qu'elle soit positive, négative ou même neutre (indifférence, lassitude, etc.) est légitime et mérite d'être exprimée. Les projets créatifs (artistiques, littéraires) ont donc toute leur place dans l'éducation aux changements climatiques².

- 1 Source : 2012, Ojala, M. Environmental Education Research, 18(5), 625-642. "Hope and climate change : The importance of hope for environmental engagement among young people.
- 2 Source : 2019, Jorgenson Simon N. et al. The Journal of Environmental Education, vol. 50, n° 3, p. 160-171: "Environmental education in transition: A critical review of recent research on climate change and energy education."

	PRISE EN COMPTE DE LA CONTRAINTE CLIMATIQUE	NIVEAU DE POSITIVITÉ	QUALITÉ ET CONSTRUCTION DE LA PRODUCTION DES ÉTUDIANTS
	Les personnages ne vivent pas dans un monde qui a changé.	L'histoire est déprimante et triste !	Production hors sujet.
Très insuffisant			
	Quelques indicateurs montrent que le monde se réchauffe.	Les personnages parviennent à s'adapter aux changements climatiques, mais à leur manière (à l'aide d'air climatisé, par exemple).	Travail inachevé, mais certains éléments sont acceptables.
Insuffisant			
	Plusieurs indicateurs montrent que le monde se réchauffe.	Les personnages interagissent entre eux ; ils expriment des idées et se montrent dynamiques dans la lutte contre les changements climatiques.	Travail inventif et structuré.
Acceptable			
	Le récit décrit bien un monde en proie au stress climatique.	Les habitants sont solidaires, imaginatifs et ont modifié leur ville ensemble pour limiter drastiquement les conséquences des changements climatiques.	Production hautement maîtrisée.
Très bon			



Les élèves imaginent leur avenir sur le thème « Les vacances en 2042 », un exercice de littérature des futurs. À quoi ressembleront les vacances en 2042 sous l'effet des contraintes climatiques ? Ici, les élèves imaginent différents aspects de leur vie en 2042. (Productions : OCE en partenariat avec DSAA, ou parcours création graphique au lycée Jacques Prévert de Boulogne Billancourt).

PARTIE 2 : EXERCICE D'INVENTION DANS UNE VILLE EN 2100

40 MIN

1. Reprendre **FICHE 8.1** et demander aux élèves d'imaginer un nouveau récit (de préférence dans un format différent de celui de la première partie). Cette fois, ils imaginent l'avenir en 2100 d'une ville qu'ils ont étudiée lors de la séance précédente :

- ~ Les élèves, en binômes, écrivent une histoire.
- ~ Ils racontent une journée-typique dans leur ville (comment on s'y déplace, ce que l'on y mange, où l'on travaille, quel est le rapport à la nature).
- ~ En binôme, ils vérifient s'il y a des synergies entre les mesures, si des ODD sont atteints dans l'histoire.

2. Pour faire valoir le travail de vos élèves, encouragez-les à partager leurs histoires en dehors de la salle de classe : blog, journal de l'école, journées portes ouvertes, etc.

CONCLUSION 10 MIN

Demandez aux élèves de présenter leurs productions et laissez la classe discuter de la pertinence des différentes mesures. Classifier ces dernières peut être délicat, car certaines peuvent être pertinentes pour l'adaptation mais pas pour l'atténuation (ex. la climatisation). L'adaptation nous sera bénéfique à court terme, tandis que l'atténuation sera fondamentale à long terme. Les deux doivent être considérées ensemble.

Concluez en disant aux élèves qu'il existe bien des solutions aux problèmes des changements climatiques, qui peuvent être mises en œuvre à différentes échelles (individu, famille, école, ville), comme le montre cette séance.

Pour illustrer d'autres échelles (pays, région, monde), vous pouvez regarder la [vidéo CLIM «Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques»](#), présentée par Sofia Palazzo (Imperial College London, Royaume-Uni). Celle-ci explique que lors des COP, les différents gouvernements se mettent d'accord sur des mesures efficaces de lutte contre les changements climatiques. De nombreuses personnes, communautés et organisations dans le monde mettent déjà en œuvre des mesures d'adaptation et d'atténuation.



VISIONNER LA VIDÉO ➔

Le monde change, mais l'humanité a la capacité et la possibilité continue de faire des choix de société pour s'y adapter. Envisager d'autres avenir est un moyen de surmonter l'éco-anxiété et d'offrir aux élèves les moyens d'agir.



EN VILLE EN 2042, SOUS STRESS CLIMATIQUE (PRODUCTION ARTISTIQUE DES ÉTUDIANTS)



La solidarité

La production artistique (risographie) et les textes sont signés par des étudiantes : Julia et Alice, Master DSAA, Lycée Jacques Prévert, Boulogne Billancourt, France © OCE.



TÉMOIGNAGES DE TROIS HABITANTS DE LA VILLE (PAR DES ÉTUDIANTES)

Linda

J'ai quitté notre appartement il y a trois minutes. J'ai enfourché mon vélo pour rejoindre mes amis Akim, Sarah et Lucy au parc. Mais ma mère vient de m'envoyer un message : elle a besoin de moi pour l'aider à la serre. Les courgettes sont mûres et doivent être récoltées. Je pédale jusqu'à la serre à la hâte - cela ne prend que 15 minutes sur la toute nouvelle piste cyclable ; il n'y a pas de feu de circulation pour m'arrêter. Cette année, j'ai mis fin à mon abonnement annuel de location de vélo car j'ai acheté un vélo au marché aux puces. Il fonctionne encore parfaitement bien ; j'ai simplement changé la chaîne et réparé les pneus crevés. Aujourd'hui, j'apporterai à Akim une Game Boy d'occasion que j'ai trouvée dans la « boîte à dons » de la salle de sport.

Enrique

Je me dirige vers la laverie collective de notre immeuble. Je n'ai pas utilisé de machine à laver individuelle depuis mon emménagement en 2035. C'est simple : nous payons une petite somme pour compenser l'empreinte écologique générée par l'achat et le fonctionnement de la machine à laver. On peut réserver des créneaux horaires pour éviter l'attente. J'aime rencontrer et discuter avec différentes personnes à la laverie. J'ai conclu un marché avec ma voisine Imany : je m'occupe de son linge et, en échange, elle me donne quelques-unes des excellentes tomates qu'elle cultive elle-même. L'eau potable étant de plus en plus rare, les machines à laver utilisent l'eau de pluie qui est recueillie dans de grands tonneaux. Et pour tirer la chasse d'eau, nous utilisons les eaux grises.

Imany

J'ai cueilli des tomates dans le jardin vertical qui jouxte notre appartement. Je donnerai quelques délicieuses tomates cerises jaunes à mon ami Enrique, qui fait ma lessive aujourd'hui. Et je prendrai les plus mûres de mes tomates cœur de bœuf fraîchement récoltées pour faire du ketchup. Mon amie Linda viendra m'aider. Dans notre ferme verticale, chaque membre a son propre petit potager où il cultive des fruits et légumes. Je cuisine toujours avec des ingrédients très frais, vu la courte distance qui sépare le potager de ma cuisine. En plus, j'adore rencontrer des voisins de l'immeuble et discuter avec eux en jardinant. Souvent, nous nous partageons des astuces pour se débarrasser des pucerons, par exemple, ou nous troquons nos surplus de récolte. L'autre jour, j'ai échangé des radis contre des fraises.

GLOSSAIRE

ACCORD DE PARIS

Un accord international sur le changement climatique, approuvé en 2015 lors de la COP21 à Paris et signé par 194 pays. Son objectif principal est de limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C d'ici la fin du siècle, par rapport à l'ère pré-industrielle.

ADAPTATION

Démarche d'ajustement aux impacts des changements climatiques, actuels ou attendus. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat ainsi qu'à ses conséquences.

ANOMALIE DE TEMPÉRATURE

Différence entre une température observée ou simulée et une valeur de référence particulière.

ATTÉNUATION

Intervention humaine visant à limiter le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre ou en augmentant les puits de ces gaz.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Terme générique désignant différents phénomènes globaux et pluriels, notamment la modification des températures ou des précipitations, la fonte des glaces (glaciers et banquises), les phénomènes météorologiques extrêmes, la hausse du niveau marin, etc. « Changement climatique » est couramment utilisé pour décrire la hausse de la température moyenne mondiale provoquée par l'activité humaine depuis la révolution industrielle.

CHOIX DE SOCIÉTÉ

Possibilités d'évolution d'une société, basée notamment sur les changements démographiques, les choix futurs en matière d'énergie, le type de développement, ou l'adoption de politiques environnementales.

CLIMAT

Ensemble des conditions météorologiques observables dans une région donnée sur une période prolongée.

CLIMAT NON PERTURBÉ

Le climat non perturbé est considéré ici comme le climat de l'ère pré-industrielle. Le climat a beaucoup varié sur de longues périodes, mais a été relativement plus stable au cours des 10 000 dernières années.

CLIMAT PERTURBÉ

Depuis la révolution industrielle (1850-1900), le climat de la Terre subit des changements rapides en raison des activités humaines.

CONFIANCE (NIVEAU DE CONFIANCE)

Dans les rapports du GIEC, le niveau de confiance renvoie au degré de certitude quant à la validité d'une conclusion, sur la base du type de preuves, de leur quantité, de leur qualité et de la cohérence entre elles, ainsi que du niveau d'accord entre les experts. Le niveau de confiance est exprimé à l'aide de cinq qualificatifs : « très faible », « faible », « moyen », « élevé » et « très élevé ». Il synthétise les jugements des équipes d'auteurs sur la validité des résultats. La confiance ne doit pas être interprétée de manière probabiliste et se distingue de la « confiance statistique ».

CONSENSUS

Un consensus scientifique repose sur un niveau de confiance élevé (accord entre scientifiques, valeur probante des preuves, etc.). Un consensus scientifique sur un sujet donné n'est pas incompatible avec la considération de tous les aspects de ce sujet, ni avec la notion d'incertitude.

DONNÉES D'ENTRÉE D'UN MODÈLE

Données que l'on fournit à un modèle.

DONNÉES DE SORTIE D'UN MODÈLE

Données produites par un modèle numérique lors d'une simulation.

ÉCHANTILLONNAGE

Réduction d'une information continue à un ensemble fini de valeurs.

EFFET DE SERRE

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère avant d'être absorbé par la surface de la Terre, ce qui la réchauffe. Le rayonnement solaire absorbé est transformé en rayonnement infrarouge (chaleur). En retournant vers l'espace, ce rayonnement infrarouge est en partie « piégé » par les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère et renvoyé vers la surface de la Terre, ce qui la réchauffe encore plus. C'est un phénomène naturel, mais renforcé par les émissions humaines.

EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU)

Une zone urbaine a une température moyenne plus élevée que ses environs ruraux en raison d'une plus grande absorption, rétention et production de chaleur par les bâtiments, les chaussées et l'activité humaine.

ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES

Événements météorologiques rares ayant un impact négatif important sur la société humaine et les écosystèmes (tonnades, incendies majeurs, sécheresses ou vagues de chaleur). Les changements climatiques augmentent la fréquence et l'intensité de certains événements extrêmes à travers le monde.

FIABILITÉ

Toutes les sources d'information ne sont pas fiables ; elles doivent toujours être vérifiées. Le GIEC évalue et compile les informations scientifiques les plus récentes sur les changements climatiques et relaie le consensus de la communauté scientifique, ce qui en fait l'une des sources d'information les plus fiables sur le sujet.

GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Les gaz à effet de serre sont à l'origine de l'effet de serre. Les principaux sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone.

GIEC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. Depuis lors, le GIEC a établi six rapports d'évaluation multivolumes. Le GIEC publie aussi des rapports spéciaux sur des thèmes précis comme les catastrophes et les phénomènes extrêmes, l'océan et la cryosphère, l'utilisation des terres, etc.

Le GIEC est ouvert à tous les pays membres de l'Organisation des Nations unies. Il regroupe 195 États. Rédigés par des centaines de scientifiques des États membres, les travaux du GIEC aboutissent également à des résumés à l'intention des décideurs, relus phrase par phrase et formellement validés à l'unanimité par les délégués des États, avec l'assentiment des auteurs scientifiques.

INCERTITUDE

Toute donnée scientifique comprend un degré d'incertitude. Les projections climatiques établies par les modèles en comprennent donc aussi. L'incertitude quant à l'ampleur des changements climatiques à venir est due à deux principaux facteurs :

- ~ les rétroactions climatiques (impliquant les nuages, l'absorption de carbone, l'absorption de chaleur par les océans, la vapeur d'eau, la glace de mer, etc.) ;
- ~ les émissions humaines à venir (liées aux politiques climatiques, à la technologie, à la politique, à la population, etc.)

INTERACTIONS

Les enveloppes de la Terre (atmosphère, hydrosphère, etc.) échangent continuellement de la matière et de l'énergie. Ces flux aident à redistribuer l'énergie solaire que la planète reçoit de manière inégale. Il existe également des interactions entre les différents milieux terrestres (la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique a des répercussions sur le climat global, et donc sur le continent européen, par exemple).

MALADAPTATION

Les solutions mises en œuvre aujourd'hui pour leur efficacité mais qui s'avèrent moins efficaces, voire inefficaces, à l'avenir.

MÉTÉO

État de l'atmosphère (intégrant entre autres la température, l'humidité, le vent et les précipitations) à un moment et en un lieu donnés.

MODÈLE

Représentation simplifiée de la réalité. Les modèles présentent de nombreux avantages, mais aussi des limites, car ils ne reflètent pas toute la complexité de la réalité. Les modèles climatiques sont des analogies de la réalité qui permettent de faire des prédictions ou des projections. Ils évoluent grâce à l'intégration de nouveaux paramètres, aux progrès informatiques et à une puissance technique accrue, offrant une résolution et une précision améliorées.

En sciences, il existe différents types de modèles : un « modèle analogique » est une représentation simplifiée de la réalité à l'aide d'objets physiques ; un « modèle numérique » est une représentation simplifiée de la réalité à l'aide de données numériques (la précision et la résolution en déterminent la qualité).

OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE (ODD)

Le développement durable répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins. Les ODD diffèrent d'un secteur à l'autre pour favoriser le développement durable.

PALÉOCLIMAT

Description du climat des époques passées.

PARAMÈTRES

Valeurs mesurables servant à caractériser un système (ex. le niveau de CO₂ en ppm caractérise le système atmosphérique). Les climatologues doivent tenir compte de plusieurs paramètres simultanément.

PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE

Prévision issue d'un modèle météo pour une date donnée et une région donnée. Les projections climatiques, elles, estiment les conditions météorologiques moyennes sur des échelles temporelles beaucoup plus longues (décennies, siècles, millénaires) dans une région donnée. Mais les prévisions météo et les projections climatiques utilisent toutes deux des modèles et souvent les mêmes paramètres.

PROJECTION CLIMATIQUE

La simulation climatique d'un scénario donné. Les projections climatiques montrent l'évolution future potentielle, calculée par un modèle, d'une valeur ou d'un ensemble de valeurs. Elles ont un fondement physique et servent à évaluer les changements climatiques mondiaux et régionaux, ainsi que leurs impacts sur des phénomènes tels que les moussons.

RÉTROACTION

Processus par lequel un effet peut modifier ses propres causes. La rétroaction positive (amplification) exacerbe les conséquences, tandis que la rétroaction négative (atténuation) les atténue.

SCÉNARIO

Sélection de données d'entrée sur la base de facteurs sociaux ou éthiques. Un scénario climatique est une représentation plausible et souvent simplifiée du climat futur. Les scénarios du GIEC sont basés sur des choix de société.

SCÉNARIO RCP

Les scénarios RCP, ou « profils représentatifs d'évolution de concentration », ont été utilisés pour évaluer différentes trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, contrairement aux scénarios SSP, les RCP n'intègrent pas les changements socio-économiques. Il existe toutefois des similitudes entre les deux. Les RCP étaient utilisés dans les précédents rapports du GIEC (comme le 5^e rapport d'évaluation).

SIMULATION

Une exécution d'un modèle numérique.

SOLUTION DE RAFRAÎCHISSEMENT

Transformation de la ville basée sur des éléments naturels, des solutions techniques ou des changements comportementaux, visant à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).

SYNERGIES

Certaines solutions pour faire face à l'effet d'ICU (adaptation) contribuent également à limiter l'augmentation de la température mondiale d'ici la fin du siècle (atténuation). De même, il y a de nombreuses synergies entre ces deux types de solutions et les ODD.

TRAJECTOIRE COMMUNE D'ÉVOLUTION SOCIO-ÉCONOMIQUE (SSP)

Scénario des changements socio-économiques mondiaux projetés qui dépendent des choix de la société. Ils intègrent toutes sortes de projections, allant des plus optimistes (SSP1-1.9 : réduction drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre) aux plus pessimistes (SSP5-8.5 : poursuite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre). Ces scénarios servent de données d'entrée aux modèles climatiques, qui eux calculent les changements climatiques correspondants. Les SSP sont utilisés dans le dernier rapport du GIEC (le sixième rapport d'évaluation).

VALIDATION

Fait de démontrer l'exactitude d'un modèle.

REMERCIEMENTS

Ce projet est le fruit d'une collaboration étroite entre l'équipe de l'Office for Climate Education, l'équipe de Météo France - CNRM et de nombreux partenaires scientifiques et éducatifs, notamment ceux participant au projet Earth System Model 2025.

Les auteurs tiennent à remercier :

Les experts qui soutiennent l'OCE et qui, par leurs retours et leurs suggestions, ont contribué à la conception des activités pédagogiques. Par ordre alphabétique : **Anwar Bhai Rumjaun, Nada Caud, Cruz Garcia, Hazel Jeffery, Colin Jones, Valentin Maron, Cliona Murphy, Mariana Rocha, Roland Sférian, Jenny Schlüpmann, Sally Soria-Dengg, Robin Waldman.**

Les experts qui ont participé à l'élaboration des activités et des vidéos interactives qui accompagnent ce manuel pédagogique. Par ordre alphabétique : **Birgit Hassler, Fiona O'Connor, Sofia Palazzo, Joeri Rogelj, Roland Sférian.**

Les personnes qui ont autorisé l'utilisation de leurs ressources pédagogiques dans ce manuel : **Valentin Maron** (séance 2), **Amela Majdanac** (séance 5), **Laure Siéfert** et ses élèves **Julia et Alice**, Master DSAA, Lycée Jacques Prévert, Boulogne Billancourt, France (séance 9).

Les enseignants et leurs élèves qui ont testé les activités dans leurs classes. Par ordre alphabétique : **Maxime Cauchois, Guillaume Chevallier, Zoé Dosière, Hadia El Gharbi, Sandrine Gayrard, Naceira Ghilaci, Olivier Girard, Mylene Gratien.**

L'enseignante **Imane Sellami**, qui a testé l'animation multimédia avec ses élèves.

Les chefs de mission EDD des académies de Créteil et de Toulouse qui ont diffusé l'appel à projets auprès des enseignants pour tester le manuel : **Christophe Escartin, Sophie Pons.**

Les organisations suivantes, qui ont autorisé l'utilisation du contenu de leurs propres publications. Par ordre alphabétique : **CIVAM, Commission européenne (Joint Research Center), GIEC, Laboratoire EFTS de Toulouse, LMD, NASA, NOAA, Our World in Data, SimClimat, UNESCO.**

Les graphistes et réalisatrices qui ont contribué à l'ergonomie et à l'attractivité de ces ressources : **Dorothée Adam, Amandine Masson, Virginie Poilievre, Mareva Sacoun.**

Enfin, l'OCE tient à remercier les organisations suivantes, dont le soutien scientifique, opérationnel et financier a été essentiel à la production de ces outils pédagogiques. Par ordre alphabétique :

Agence française de développement, Association Météo et Climat, Centre national de recherche scientifique, Fondation Ginkgo, Fondation Luciole, Fondation pour l'éducation à l'environnement, Fondation Prince Albert II de Monaco, Institut Pierre-Simon Laplace, Institut de recherche pour le développement, Météo-France, Ministères français de l'éducation et de la transition écologique, Siemens Stiftung, Sorbonne-Université, UNESCO, Unités de soutien technique des groupes 1, 2 et 3 du GIEC.

CRÉDITS

Page 5	Norman Kuring, NASA	Page 46	Decitre Sylvie, Collège Exbrayat de la Grand-Croix, OCE
Page 10	Ghilaci Naceira (Lycée professionnel Renée Bonnet, Académie de Toulouse), OCE	Page 51	Amela Majdanac
Page 16	William O. Field Bruce F. Molnia	P. 53 à 57	Camille Risi, LMD-IPSL
P. 24 à 27	Valentin Maron (laboratoire EFTS)	Page 66	Google Earth Greenpeace Perlinkinso, Wikimedia commons Terre-net Média
Page 29	Anton Savinov, Unsplash Airam Datoon, Pexels Hexagons image, Pixabay Erik Witsoe, Unsplash Kurt Cotoaga, Unsplash R Architecture, Unsplash Matteo Catanese, Unsplash	Page 67	Suvrajit, Unsplash Dieter Staab, Pixabay Franck Barske Eszter Miller, Pixabay Eliza, Pixabay
Page 30	OCE	Page 68	Suvrajit S, Unsplash
Page 35	Photogravure Meisenbach Riffarth & Co. Leipzig, Wikipedia	Page 69	Dieter Staab, Pixabay
Page 36	Emma Haziza, Wikipedia	Page 71	Imane Sellami (Lycée français international André Malraux, OSUI, Maroc), OCE
Page 37	AIP Emilio Segrè Visual Archives, Gift of Bill Woodward, USNS Kane Collection, Wikipedia	Page 73	Mathieu Hirtzig & Benjamin Gibeaux, OCE
Page 38	Edward Alexander Newell Arber, Wikipedia	Page 78	DSAA (Diplôme supérieur d'arts appliqués design graphique, lycée Jacques Prévert, Boulogne-Billancourt), OCE
Page 39	William Shaw Warren, Wikipedia		
Page 44	Christophe Hendrickx, Wikipedia		

N'hésitez pas à nous faire part de vos commentaires sur ce manuel : nous vous en serions reconnaissants.



Le climat entre nos mains est une collection de ressources pédagogiques pour le primaire et le secondaire créée par l'Office for Climate Education et ses partenaires.

Ce troisième volume, intitulé **Modèles climatiques**, propose aux enseignants des leçons clés en main qui aideront les élèves à comprendre le changement climatique dans ses dimensions scientifiques et sociétales, aux niveaux local et mondial, à développer leurs capacités de raisonnement et à les guider pour prendre des mesures (d'atténuation et/ou d'adaptation) au sein de leur école ou de leur communauté.

Plus encore que dans les deux manuels précédents, celui-ci met l'accent sur ce que sont les modèles climatiques, comment les modèles intègrent la complexité du système climatique terrestre, ou encore la différence entre les projections et les scénarios.

Ce manuel fait partie d'un projet européen sur les modèles climatiques : **Earth System Models for the future (ESM2025)**, coordonné par Météo-France – CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques). L'objectif du projet est de développer la prochaine génération de modèles climatiques du système terrestre (ESM) qui fourniront des simulations climatiques pertinentes, pour le déploiement de stratégies d'atténuation et d'adaptation ambitieuses et réalistes. En s'appuyant sur les principales communautés d'acteurs impliqués dans le projet, ESM2025 fournira des connaissances et des conseils scientifiques pertinents. Ces derniers ont but l'appui aux politiques publiques nécessaires aux transformations sociétales en vue d'une société net zéro carbone et résiliente au changement climatique.

ESM2025 souhaite également cibler spécifiquement la jeune génération en créant des ressources éducatives, afin de lui donner les moyens d'améliorer sa compréhension du changement climatique et ses possibilités d'agir. Le projet a aussi pour but de favoriser les transformations sociétales nécessaires pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

Cette ressource pédagogique :

- s'adresse aux enseignants du lycée (pour les élèves de plus de 15 ans);
- comprend des éclairages scientifiques et pédagogiques, des leçons, des feuilles d'activités associées et des liens vers des ressources (vidéos et activités multimédias);
- est interdisciplinaire avec des leçons couvrant les sciences, les sciences sociales, les arts et la narration;
- encourage les pédagogies actives : démarche d'investigation, démarche scientifique, jeu de rôle, animations multimédias, langage informatique, pédagogie de projets.



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



UNDER THE AUSPICES OF UNESCO
AND THE FOUNDATION LA MAIN À LA PÂTE



GRANT AGREEMENT
N° 101003536

