



cité

**sciences
et industrie**

Urgence climatique

À partir de la 4^e
Ressources



Département Éducation et Formation
educ-formation@universcience.fr

2023

SOMMAIRE

En un coup d'œil	3
Ressources	
I Médiations en lien avec l'exposition	4
II Atelier Explor'Actions	6
III Rencontre-visitte enseignants du 7 juin 2023	6
IV Conférences	7
V Les éditions autour de l'exposition	8
VI Suggestion bibliographique	9
VII Sitographie	
VII.1 Sur le Blob	10
VII.2 Ailleurs	13
VIII Liens avec les programmes scolaires	14
IX Les neuf limites planétaires	17
X Un modèle très simplifié de l'effet de serre	18
XI CO ₂ , effet de serre et forçage radiatif	23
Informations pratiques	27

En un coup d'œil

Face au défi climatique, l'humanité doit dès aujourd'hui repenser son rapport au monde et engager des transformations profondes, collectives, à tous les échelons de nos sociétés pour éviter la catastrophe. Si le constat est sombre, il n'en est pas moins un puissant générateur d'espoir, porté par des actions collectives mobilisatrices, des initiatives citoyennes et de nouvelles façons de concevoir le monde en matière d'innovations sociales, environnementales et économiques.

L'exposition *Urgence climatique* offre une vue d'ensemble des mécanismes qui visent à concilier un double impératif : la décarbonation et la résilience de nos sociétés. Son objectif est de montrer que la lutte contre le réchauffement climatique doit mobiliser tous les acteurs de la société afin d'espérer atteindre un monde décarboné pour la deuxième moitié de ce siècle. Au centre de l'exposition, le dispositif de datavisualisation *Data du futur*, inauguré en 2021, invite le public à imaginer et entrevoir les futurs possibles de notre planète. Ce film est à découvrir en trois tableaux : des humains et des chiffres / une planète sur ses réserves / un climat sous surveillance.

Page de l'exposition sur le site internet de la Cité des sciences et de l'industrie
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/expos-permanentes/urgence-climatique>

Jean Jouzel, paléoclimatologue, est le commissaire scientifique de cette nouvelle exposition permanente. Médaille d'or du CNRS, il fut vice-président du groupe de travail sur les bases physiques du changement climatique au sein du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Ressources

I Médiations en lien avec l'exposition

Animation « L'eau et ses enjeux »

Pour les collégiens

Durée : 45 minutes, à partir du 16 mai 2023

Déroulement

Quelle est notre consommation moyenne en eau par jour et par Français ? Que représente l'eau virtuelle qui se cache derrière la fabrication de chaque objet ou aliment ? À travers des exemples concrets, les élèves sont invités à prendre conscience de leur consommation quotidienne et les impacts de celle-ci. La gestion de cette ressource a de nombreuses répercussions sur l'environnement et ce, à l'échelle planétaire.

Objectifs

- Faire prendre conscience aux élèves de leur consommation d'eau au quotidien et la comparer avec celle d'autres habitants sur la planète.
- Découvrir le concept de l'eau virtuelle.
- Echanger sur la disponibilité de l'eau sur notre planète.
- Comprendre que les enjeux de l'eau sont principalement à l'échelle planétaire.

Atelier-débat « Le forum de l'Anthropocène »

De la 3^e à la terminale

Durée : 45 minutes

Déroulement

Les ressources de notre planète ne sont pas illimitées et les activités anthropiques modifient profondément notre planète.

Les élèves sont amenés à positionner des affirmations sur une échelle d'acceptabilité. Il s'agit de propositions d'actions qui pourraient être envisagées pour faire face aux changements globaux environnementaux contemporains : Qu'est-on prêt à accepter ? Quelles limites serions-nous prêts à franchir ou non ? Ce sera l'occasion pour les élèves de débattre sur ces thématiques complexes et exercer leur esprit critique.

Exemple d'enjeux ou de thématiques pouvant être discutés : la surconsommation, la surpopulation, l'agriculture d'aujourd'hui (et de demain...), etc.

Objectifs

- Découvrir le concept de l'Anthropocène et ses enjeux.
- Prendre conscience de la complexité du système Terre et des sujets socio-environnementaux.
- S'interroger, débattre et développer l'analyse critique pour mieux décider et agir dans la société.

Exposé interactif « Problématiques plastiques »

De la 5^e à la 2^{de}

Durée : 45 minutes

Déroulement

Cette médiation propose aux élèves d'explorer diverses facettes des matières plastiques, depuis leur production jusqu'à leur fin de vie :

- Les matières plastiques : quelle(s) origine(s) ? quelle place dans l'histoire des matériaux ?
- Qu'est-ce qu'un plastique ?
- Quelle production dans le monde ?
- De la production à l'océan : comment un plastique peut-il se retrouver au milieu de l'océan
- De la conception à la fin de vie des objets : quelles alternatives ?

Pour appréhender la complexité du sujet, les élèves seront répartis en différents groupes ce qui leur permettra, à travers une participation active, d'en avoir une vision objective et globale.

Objectifs

- Prendre conscience de l'omniprésence des plastiques dans notre monde contemporain, discuter de leurs avantages et des problèmes qu'ils posent.
- Analyser le cycle de vie des plastiques.
- Analyser la complexité des enjeux liés aux plastiques.
- S'interroger et s'initier au développement d'une démarche scientifique et critique

Enfin, une **animation « Urgence climatique »** (titre provisoire) destinée aux lycéens est en cours de développement, avec une phase de test prévue durant les mois de mai et de juin et une mise au catalogue à partir d'octobre 2023.

L'objectif de cette animation sera de faire vivre aux élèves des situations passées ou présentes de conflits en lien avec l'eau en France. Les participants joueront le rôle de médiateur face à un conflit, avec plusieurs acteurs de terrain (par exemple : un promoteur immobilier, un écologiste, un habitant, un élu, un agriculteur, un industriel...) ayant des enjeux différents et parfois contraires liés à la ressource eau. Les élèves devraient trouver collectivement les solutions qui leur semblent les plus pertinentes au regard des trois piliers du développement durable (social, environnement et économique).

À suivre !

II Atelier Explor'Actions

L'atelier [Explor'Actions](#) autour de l'exposition *Urgence climatique* est idéal pour préparer votre future visite de groupe, s'inspirer et découvrir de nombreuses ressources et activités, imaginer des projets pédagogiques et échanger entre professionnels. L'atelier interactif et collaboratif est proposé gratuitement aux professionnels de l'éducation.

Au programme :

- Visite commentée de l'exposition
- Présentation des ressources et offres disponibles sur les thématiques proches
- Temps collectif entre pairs, pour élaborer son propre parcours

Une séance est ouverte, le **mercredi 4 octobre 2023**, de 14h00 à 16h30 – en présentiel à la Cité des sciences et de l'industrie, Paris 19^e.

III Rencontre-visitte enseignants du 7 juin 2023

À l'occasion de l'ouverture de l'exposition permanente *Urgence climatique*, Universcience a proposé à la communauté éducative une « rencontre-visitte » exceptionnelle le mercredi 7 juin 2023. Plusieurs moments forts ont ponctué cette journée : une interview de Jean Jouzel, des témoignages d'experts, d'enseignants et d'élèves, une visite accompagnée de l'exposition et une sélection de médiations associées.

« L'école et le musée se transforment pour aborder la crise climatique. Ainsi, la place des enseignements sur le climat, la biodiversité et le développement durable est plus importante dans les programmes scolaires. De plus, le musée propose des nouvelles formes de communication qui favorisent l'apprentissage du changement climatique sur un mode sensible. Ces évolutions à l'école et au musée contribuent au développement de connaissances, compétences et attitudes qui permettent d'agir en faveur du climat.

La Cité des sciences et de l'industrie déclare avec cette exposition l'Urgence climatique. L'équipe du département éducation et formation d'Universcience est là pour vous accompagner dans la construction de parcours autour de ce thème. Cette journée en fut la première étape et avait pour but de faire Cité, autrement dit de sortir de l'éco-anxiété pour construire ensemble un monde vivable. »

Au programme

T'educ « Urgence climatique : s'émouvoir, comprendre, agir à l'école et au musée ».

Interview de **Jean Jouzel**, climatologue, vice-président du Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2002 à 2015, commissaire scientifique de l'exposition *Urgence climatique*.

Message vidéo de **Stefania Giannini**, Sous-Directrice générale pour l'éducation de l'UNESCO.

Table ronde :

Sophie Bougé, co-commissaire de l'exposition *Urgence climatique*

Simon Klein, écologue, docteur et médiateur scientifique à l'Office for Climate Education

Lycéens de l'académie de Créteil

L'interview de Jean Jouzel comme la table ronde qui suivra ont été animées par **Marie-Catherine Mérat**, journaliste scientifique.

Un podcast audio de cette rencontre est en cours de réalisation. N'hésitez à consulter, de temps en temps, la page suivante pour vous informer sur la mise en ligne :

<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants>.

IV Conférences

La Cité des sciences et de l'industrie organise régulièrement des cycles de conférences dont vous pouvez obtenir le programme [ici](#). Dans le cadre du thème [Métamorphoses : quelles dynamiques ?](#) et de l'exposition *Urgence climatique*, le cycle [Des solutions pour s'adapter d'urgence](#) a pour descriptif :

« Le changement climatique pose des défis considérables à toutes les sociétés humaines de la planète. Comment le cycle de l'eau est-il impacté, entre inondations et sécheresses, et comment répondre à sa potentielle intensification ? Quels modèles d'adaptation peut-on trouver dans le vivant ? ». Ce cycle a proposé une conférence.

Inondations, sécheresses : le cycle de l'eau bouleversé ?

Mardi 16 mai à 18 h 30

Les changements dans les extrêmes du cycle de l'eau nous alertent et posent question. Ces changements sont-ils réels, ou assistons-nous à des variations « naturelles » ? Sans préjuger de la réponse, quelles seraient les mesures d'adaptation possibles face à une intensification du cycle de l'eau ? Quel rôle pourraient jouer les barrages-réservoirs tant décriés, et quelles alternatives restent à imaginer ?

Par **Vazken Andréassian**, hydrologue, directeur de l'Unité de Recherche HYCAR (Hydrosystèmes Continentaux Anthropisés - Ressources, Risques, Restauration) à l'Inrae.

Vous pouvez la retrouver en intégralité ici :

<https://www.cite-sciences.fr/fr/ressources/conferences-en-replay/saisons/saison-2022-2023/des-solutions-pour-sadapter-durgence>



V Les éditions autour de l'exposition

Le journal d'exposition

Un journal conçu comme un souvenir de l'exposition, s'appuyant sur des textes, interviews, données sur la thématique du changement climatique.

Format 21,5 x 42 cm ; 24 pages ; prix public **5,95 €** TTC. Vendu à la boutique et à la billetterie, sur place et [en ligne](#).

Un cahier d'activités

Ce carnet d'activités invite les enfants à mettre en pratique chez eux des expérimentations et observations liées aux questions environnementales actuelles.

5,95 €.



VI Suggestion bibliographique

Dans le cadre de l'ouverture de l'exposition permanente *Urgence Climatique*, la bibliothèque de la Cité des sciences et de l'industrie (<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque>) propose une sélection d'ouvrages à lire ou à emprunter à la bibliothèque.

Pour une description de ces ouvrages, nous vous renvoyons à la page qui leur est dédiée : <https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/selections-documentaires/urgence-climatique>

En voici la liste :

Séquence « Décarbonons »

- J.-M. Jancovici, C. Blain et C. Sapin, **Le monde sans fin**, éd. Dargaud, 2021.
J. Jouzel et D. Baptiste, **Climat. Parlons vrai**, éd. Les Pérégrines, 2021.
M.-A. Mélières, C. Maréchal et N. Hulot, **Climats. Passé, présent, futur**, éd. Belin, 2015.
R. Kandel, **Le réchauffement climatique**, Que Sais-je ? Sciences n°3650, éd. Presses universitaires de France / Humensis, 2019.
F.-M. Bréon, G. Luneau, H. Piolet et J. Jouzel, **Atlas du climat. Face aux défis du réchauffement**, éd. Autrement, 2021.
G. Thunberg, C. Leclère, L. Talaga et I. Taulière, **Le grand livre du climat**, éd. Calmann-Lévy, 2022.
S. Delcourt et É. Perrot, **Comment décarboner le transport routier en France ?**, éd. La Fabrique de l'industrie, 2021.
B. Calatayud, **L'hydrogène suffira-t-il à décarboner l'économie ?**, éd. de L'Aube, 2022.
P. Charlez, **Les dix commandements de la transition énergétique**, éd. VA, 2022.
J.-F. Mouhot, **Des esclaves énergétiques. Réflexions sur le changement climatique**, éd. Champ Vallon, 2011.

Séquence « Anticipons »

- A. Aurias et V. Masson-Delmotte, **Nos futurs**, éd. ActuSF, 2020.
J.-M. Ligny, **Aqua™**, éd. Gallimard, 2015.

Séquence « Agissons »

- J. Brunner et G. Klein, **Le troupeau aveugle**, éd. Le Livre de Poche, 1998.
M. de Radiguès et H. Piette, **Eddie et Noé. Plus chauds que le climat !**, éd. Sarbacane, 2023.
Ó. M. Vázquez, V. Pavie, T. Kremer, C. Lefèvre, D. Poidvin et J. Malassenet, **Détails de réhabilitation écologique**, éd. Le Moniteur, 2015.
A. Masbounji, F. Boutté, F. Dupont et F. Boutté, **200 initiatives pour la transition énergétique des territoires. Qui peut faire quoi ?**, éd. Le Moniteur, 2018.
T. Salomon, M. Jedliczka, Y. Marignac, S. Hessel et A. Bloch Lovins, **Manifeste Négawatt. Réussir la transition énergétique**, éd. Actes Sud, 2012.

D. Ratte et M. Ratte, **Réfugiés climatiques & castagnettes**, éd. Bamboo, 2021.
E. Callenbach, **Écotopia**, éd. Gallimard, 2021.
A. Belot, **Déchets land. La face cachée de nos déchets**, éd. Thierry Souccar, 2021.
P. Bardin, É. Bourré-Guilbert et N. Gobbi, **À vos rateaux ! De la terre à l'assiette, petit récit d'une transition réussie**, éd. Steinkis, 2022.
J. Marines, **Oxygen**, éd. SNAG, 2020.
S. Burke, **Semiosis**, éd. Le Livre de poche, 2022.

Hors sélection mais à lire également :

Revue **Science et pseudo-sciences**, n°339 (janvier 2022), dossier *Transition énergétique (partie 1) : mieux comprendre les controverses*.
Revue **Science et pseudo-sciences**, n°340 (avril 2022), dossier *Transition énergétique (partie 2) : hydrogène, nucléaire, stockage...*
S. Huet, **Le GIEC Urgence climat. Le rapport incontestable expliqué à tous**, éd. Tallandier, 2023.
F.-M. Bréon, **Réchauffement climatique**, éd. humenSciences, coll. Quoi de neuf en sciences ?, 2020.

En anglais

W. Hay, **Experimenting on a Small Planet. A History of Scientific Discoveries, a Future of Climate Change and Global Warming**, éd. Springer, 2021 (Third, Updated and Enlarged, Edition). Une somme (1000 pages !) qui traite de la science du climat et du changement climatique sous tous ses aspects, tout en restant toujours accessible.

VII Sitographie

VII.1 Sur le blob

Universcience, l'établissement public qui réunit la Cité des sciences et de l'industrie et le Palais de la découverte, a lancé en mars 2019 [le blob, l'extra-média](#). Gratuit, sans abonnement et sans publicité, le blob est un média de service public. Le blob propose une nouvelle vidéo à la une chaque jour, avec un fil d'actualité scientifique quotidien et des enquêtes mensuelles sur les grands enjeux contemporains, mêlant donc sujets de fond et actualité « chaude ».



Dans l'onglet « Rechercher », tapez les mots ou termes clés « GIEC », « rapport du GIEC », « réchauffement climatique » et le moteur de recherche vous fournira un grand nombre de liens vers des articles et des vidéos de grande qualité.

Le Blob propose aussi une série intitulée « Dans les coulisses du climat », dont le lien direct est : <https://leblob.fr/series/dans-les-coulisses-du-climat>

« Rapport après rapport, le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) analyse les manifestations et les causes du changement climatique. Mais sur quelles observations et quelles expériences scientifiques ses travaux s'appuient-ils ? »

Dix vidéos, produites en 2021, sont disponibles :

Sonder les océans 7 min 11 s

<https://leblob.fr/videos/sonder-les-océans>

Mieux comprendre la physique, la chimie et la biologie des océans, et ainsi mieux prévoir leurs effets sur l'évolution du climat, c'est l'objet du réseau scientifique mondial de flotteurs profileurs Argo. Des plateformes autonomes qui parcourent les profondeurs aquatiques à la rencontre des courants et du petit peuple océanique. Dernier-né de cette flotte, un petit bijou de technologie, le flotteur profileur BGC-Argo (nKe), spécialement équipé pour étudier le plancton. Découverte avec l'équipe du Laboratoire d'océanographie de Villefranche-sur-Mer.

Quand la mer monte 7 min 55 s

<https://leblob.fr/videos/quand-la-mer-monte>

Les océans absorbent 90% de la chaleur dégagée par nos émissions de gaz à effet de serre. Résultat : ils se réchauffent, se dilatent et grignotent les côtes – au rythme de 3,5 mm par an. Comment mesurer ce discret phénomène et donc prévoir son évolution ? À La Rochelle, une équipe du laboratoire LIENSs (CNRS/La Rochelle Université) multiplie les mesures, grâce au marégraphe de l'île d'Aix, au drone Pamelis et aux données satellitaires.

Changement climatique : quel vin demain ? 7 min 33 s

<https://leblob.fr/videos/changement-climatique-quel-vin-demain>

La hausse des températures et la répartition des sécheresses menacent la production viticole de la France – la deuxième au monde après celle de l'Italie. Comment la vigne supporte-t-elle ce climat plus aride ? Quels cépages privilégier ? Pour répondre à ces questions et identifier les variétés de demain, une équipe de l'Inrae conduit à Montpellier une étude très ambitieuse, grâce à une collection de vignes unique au monde et une serre géante high-tech.

Désert : grains de sable dans la machine 7 min 39 s

<https://leblob.fr/videos/désert-grains-de-sable-dans-la-machine>

Au printemps dernier, la France s'est couverte d'un fin voile orange, charrié par les vents sahariens : des poussières de sable. Le phénomène est donc banal sous les latitudes européennes. Ce qui l'est moins, c'est l'effet de ces poussières sur le climat. Un effet pas facile à mesurer, vu l'étendue du phénomène - des voyages sur des milliers de kilomètres - et la taille des particules - millimétrique, voire moins ! À Créteil, une équipe de physiciens a recours à un outil original : Cesam, une « chambre de simulation atmosphérique ». Dans cette enceinte, l'équipe recrée des tempêtes de sable miniatures pour mesurer les effets chimiques et optiques des poussières sur le rayonnement solaire. Récit.

Amazonie : le poumon suffoque

6 min 36 s

<https://leblob.fr/videos/amazonie-le-poumon-suffoque>

Grâce à la mobilisation des habitants sur place et à l'analyse d'images satellite, une équipe parvient à retracer l'évolution actuelle du climat de l'Amazonie : plus de sécheresse au sud, plus d'humidité au nord. Avec des conséquences en cascade sur le climat mondial...

Tourbières : pièges à carbone

7 min 31 s

<https://leblob.fr/videos/tourbieres-pieges-carbone>

Les zones humides couvrent 3% de la surface du globe mais captent un tiers du carbone piégé dans les sols. Comment réagissent-elles à l'évolution des températures ? Pour le savoir, des chercheurs ont installé une panoplie d'instruments sur un site proche de Cournon, dans les Pyrénées.

Modélisation : le climat en équations

7 min 9 s

<https://leblob.fr/videos/modelisation-le-climat-en-equations>

Ce sont des ensembles d'équations qui représentent les phénomènes physiques – comme la circulation de l'eau ou du carbone – affectant notre planète : des modèles, en un mot. Comment sont-ils élaborés ? À quoi servent-ils ? Rencontre avec les scientifiques qui, grâce aux modèles, lancent l'alerte.

Sécheresse : le futur est dans le pré

7 min 9 s

<https://leblob.fr/videos/secheresse-le-futur-est-dans-le-pre>

Pour simuler le climat de 2050 et ses épisodes de sécheresse plus fréquents et plus longs, des chercheurs en agronomie de Lusignan, près de Poitiers, ont conçu une serre mobile high-tech avec suivi par drone et images 3D. Là germeront peut-être les futures variétés des prairies européennes...

Cet épisode de la série a été sélectionné au Deauville Green Awards 2022, le festival international du film responsable.

Glaciers : les sentinelles du climat

6 min 47 s

<https://leblob.fr/videos/glaciers-les-sentinelles-du-climat>

Altitude, climat, éloignement : impossible de multiplier les campagnes de terrain pour suivre l'évolution des glaciers. Il faut donc combiner les mesures in situ, sur le terrain, et les images satellitaires. À Grenoble, une première description mondiale a ainsi pu être élaborée. Avec des résultats inquiétants.

Gaz à effet de serre : prenons de la hauteur

6 min 47 s

<https://leblob.fr/videos/gaz-effet-de-serre-prenons-de-la-hauteur>

La mesure des gaz à effet de serre (GES) est un indicateur essentiel de l'état de santé de notre planète, actuel et futur. La tâche n'est pas simple ! Heureusement, depuis vingt ans, de nouveaux instruments permettent de mieux suivre les concentrations de GES, comme à Traînou, dans le Loiret.

VII.2 Ailleurs

La Bibliothèque de la Cité des sciences et de l'industrie vous propose des dossiers en ligne, accessibles ici :

<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers>

Certains ont un rapport plus ou moins intime avec l'exposition *Urgence climatique*, comme :

- La démarche scientifique (2021)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/la-demarche-scientifique>
- Tissus écologiques et durables (2020, mise à jour 2022)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/tissus-ecologiques-et-durables>
- Les dérives du plastique (2020)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/les-derives-du-plastique>
- Crise de la biodiversité et épidémies (2020)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/crise-de-la-biodiversite-et-epidemies>
- Désertification, un enjeu du développement durable (2012, mise à jour 2022)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/desertification-un-enjeu-du-developpement-durable>
- Pesticides : peut-on s'en passer ? (2011, misé à jour 2018)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/pesticides-peut-on-sen-passer>
- Gaz de schiste en débat (2012, mise à jour 2014)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/gaz-de-schiste-en-debat>
- Nourrir le monde en 2050 (2012, mise à jour 2013)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/nourrir-le-monde-en-2050>
- Les cyclones : quelles menaces et comment les prévenir ? (2013, mise à jour 2022)
<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/bibliotheque/chercher-trouver/ressources-en-ligne/dossiers/les-cyclones-queelles-menaces-et-comment-les-prevenir>



VIII Liens avec les programmes scolaires

Présentés selon des approches interdisciplinaires et transversales, les enjeux liés à l'environnement et au développement durable sont au cœur des enseignements du CP à la classe terminale. La [rubrique](#) très complète que l'on peut trouver sur le thème de l'éducation au développement durable sur le site web d'[Éduscol](#) se propose d'accompagner l'enseignement de l'éducation au développement durable et la transition écologique par des éclairages thématiques et des ressources spécifiques, pour les enseignants ainsi que les élèves éco-délégués.

Cette rubrique est accessible directement ici : <https://eduscol.education.fr/1117/education-au-developpement-durable>

Vous y trouverez, parmi bien d'autres sujets, des ressources pédagogiques thématiques sur la biodiversité, le changement climatique, les océans et les pôles (ressources d'accompagnement des programmes scolaires, ressources académiques et ressources de partenaires).

✚ **Les océans et les pôles**
(<https://eduscol.education.fr/2252/ocean-et-poles>)

✚ **La biodiversité**
(<https://eduscol.education.fr/1133/biodiversite>)

Sciences de la vie et de la Terre au cycle 4

Thème 1 - La planète Terre, l'environnement et l'action humaine

- [Les coussouls de Crau](#) aborde les actions humaines et le maintien de la biodiversité.
- [La steppe de Crau](#) aborde la mise en place et la conservation d'un écosystème exceptionnel

Thème 2 « Le vivant et son évolution » - Relier l'étude des relations de parenté entre les êtres vivants, et l'évolution

- [Identifier les caractères des espèces au travers de l'exemple de la coccinelle asiatique \(Harmonia axiridis\)](#)
- [Utilisation d'outils nomades en sortie sur la biodiversité : skitch et clé de détermination](#)
- [Utilisation d'outils nomades en sortie sur la biodiversité : traitement de textes et clé de détermination](#)
- [Mettre en œuvre son enseignement en s'appuyant sur le contexte local](#)

Enseignements interdisciplinaires

[Migration des Irlandais aux États-Unis et biodiversité](#) - La problématique Comment des modifications de la biodiversité peuvent entraîner des phénomènes migratoires de la population humaine ? est abordée à la fois en histoire-géographie, en anglais et en sciences de la vie et de la Terre.

Programmes et ressources en sciences de la vie et de la Terre - voie GT

Télécharger le document d'[actualisation des connaissances sur la Biodiversité](#).

Thème 1 - La Terre, la vie et l'organisation du vivant

- Niveau seconde [Biodiversité, résultat et étape de l'évolution](#)
- Niveau seconde Séquences pour l'enseignement commun SVT [Biodiversité génétique des abeilles et activités humaines](#) et [Mesure et cartographie de la biodiversité des lichens sur un territoire donné](#)

Thème 2 - Enjeux contemporains de la planète

- Niveau première [Les écosystèmes et services environnementaux](#)

Le changement climatique

(<https://eduscol.education.fr/1132/changement-climatique>)

Géographie

Au cycle 4 - [Thème 3 : Prévenir les risques, s'adapter au changement global](#).

En seconde générale et technologique - Environnement, développement, mobilité : les défis d'un monde en transition : [Sociétés et environnements : des équilibres fragiles](#). Dans un monde marqué par une accélération des changements, dont le changement climatique, il s'agit d'étudier les effets des interactions entre ces différents processus afin de voir comment les sociétés, c'est-à-dire des collectivités qui occupent des territoires à différentes échelles, subissent, aménagent et valorisent leurs environnements, à savoir leurs cadres de vie, y compris urbains.

Mathématiques

En première générale, mathématiques intégrées - Thème Phénomènes d'évolution - [Modélisation de l'élévation du niveau des océans](#)

En première voie professionnelle - Module Statistiques à deux variables quantitatives : [Glace en Arctique et température globale de la Terre](#) et [annexe](#).

Enseignement scientifique

En terminale - Thème 1 : science, climat et société

- Les essentiels pluridisciplinaires : [Modélisation numérique et projections climatiques](#)
- Les documents pour la classe :
 - [Forçages radiatifs et réchauffement climatique](#)
 - [Variations de la concentration atmosphérique de CO₂ à différentes échelles de temps](#)
 - [Concentration de CO₂ atmosphérique et émissions anthropiques](#)
 - [Établir le rôle de différents paramètres sur l'évolution climatique en exploitant un logiciel de simulation](#)

En première, une ressource produite par le groupe de recherche et d'innovation pour l'enseignement des sciences physiques (GRIESP) pour travailler la place de l'oral dans la formation à la démarche de projet en physique-chimie : [Exemple de projet expérimental et numérique en enseignement scientifique - Météorologie](#).

Sciences de la vie et de la Terre au lycée général et technologique

En seconde générale et technologique - Thème 2 - Enjeux contemporains de la planète - Vision globale des sous-thèmes : [Nourrir l'humanité : vers une agriculture durable pour l'humanité ?](#)

En terminale - Thème 2 - Enjeux contemporains de la planète - Vision globale des sous-thèmes : [Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain](#)

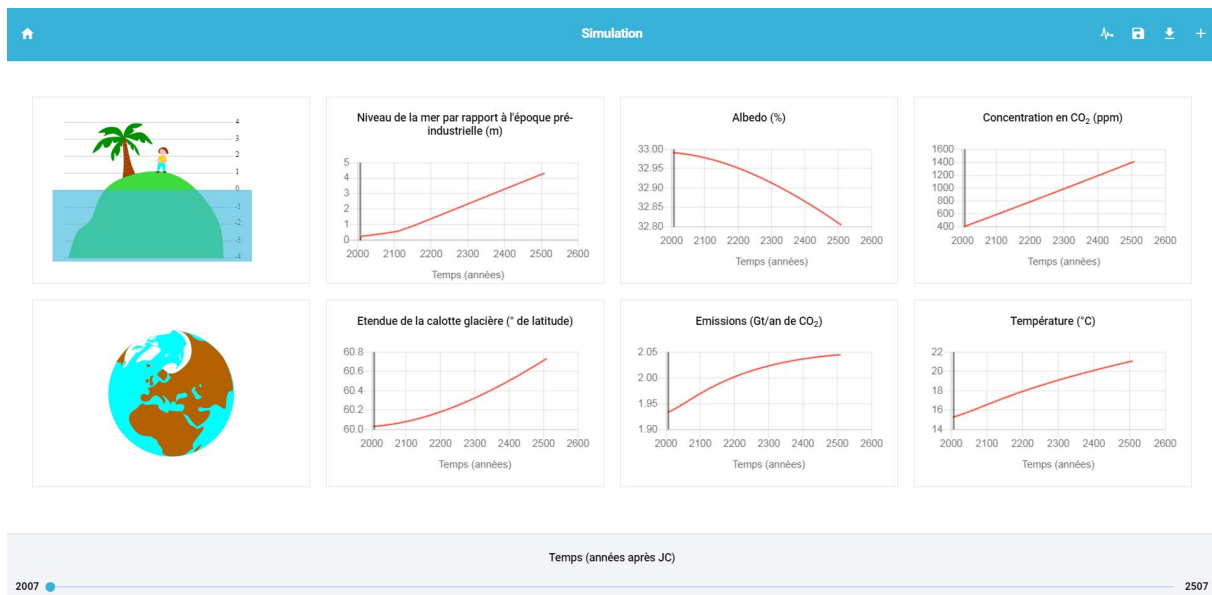
En terminale - Thème 2 - Enjeux contemporains de la planète - Séquences pour l'enseignement de spécialité SVT : [Argumenter à l'oral sur les actions pour faire face au changement climatique](#)

SimClimat : un logiciel pédagogique de simulation du climat

Le [logiciel SimClimat](#) est un outil pédagogique permettant de traiter de nombreux points des programmes liés au climat en enseignement scientifique et en SVT au lycée.

Par une interface ludique et conviviale, il permet de réaliser des simulations climatiques à différentes échelles de temps. Les résultats concernant la température globale de surface, le niveau de la mer, l'extension des calottes de glace et la composition de l'atmosphère s'affichent sous forme de courbes et de dessins. L'utilisateur peut tester l'influence de divers paramètres influençant le climat, tels que les paramètres astronomiques ou la composition de l'atmosphère, et peut brancher ou débrancher certaines rétroactions climatiques.

- [Simclimat, un modèle numérique de climat](#)
- [Simclimat pour comprendre les variations climatiques passées](#)
- [Utiliser Simclimat pour conduire une démarche scientifique](#)



Une capture d'écran du logiciel SimClimat.

IX Les neuf limites planétaires

En 2009, une équipe internationale publia un article dans lequel elle identifiait neuf limites planétaires à ne pas dépasser si l'humanité voulait pouvoir se développer dans un écosystème sûr, c'est-à-dire évitant les modifications brutales, non-linéaires, potentiellement catastrophiques et difficilement prévisibles de l'environnement. Elles ont été actualisées en 2015. En voici la liste :

- Changement climatique
- Érosion de la biodiversité
- Perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore
- Changement d'utilisation des sols
- Utilisation de l'eau douce
- Appauvrissement de l'ozone stratosphérique
- Acidification des océans
- Introduction d'entités nouvelles dans la biosphère
- Augmentation des aérosols dans l'atmosphère

Au moins cinq des neuf limites ont déjà été franchies à ce jour :

→ **Changement climatique.** La concentration atmosphérique en CO₂ (dioxyde de carbone) devrait rester inférieure à 350 ppm (parties par million) ou le forçage radiatif – écart entre le rayonnement solaire reçu par une planète et le rayonnement infrarouge qu'elle émet sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, tels que la variation de la concentration en gaz à effet de serre – limité à + 1 W.m⁻². Leur valeur s'élève aujourd'hui à 415 ppm et + 3,22 W.m⁻² respectivement.

→ **Érosion de la biodiversité.** Alors que le nombre d'extinctions par million d'espèces et par an devrait être inférieur à 10, il semble être compris entre 100 et 1 000.

→ **Perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore.** Limitée à 11 millions de tonnes par an, l'entrée du phosphore dans les océans se monte aujourd'hui à 22 millions de tonnes par an. Dans les systèmes aquatiques à eau douce, on en est à 14 millions de tonnes par an au lieu d'un maximum toléré de 6,2 millions de tonnes par an. Pour l'azote, le maximum de la fixation par l'agriculture et l'industrie est fixé à 62 millions de tonnes par an, valeur qu'il convient de comparer aux 150 à 180 millions de tonnes par an réellement fixées.

→ **Changement d'utilisation des sols.** Les forêts originelles n'occupent plus que 62 % de la surface qu'elles occupaient initialement, alors qu'un minimum de 75 % constitue une limite planétaire.

→ **Utilisation de l'eau douce.** Si la limite des 4 000 km³/an de consommation des ressources en eaux de ruissellement n'est pas franchie, une étude publiée en 2022 estime que la limite relative à l'humidité des sols est dépassée.

→ **Introduction d'entités nouvelles dans la biosphère.** Une étude de 2022 quantifie les concentrations en plastiques, perturbateurs endocriniens, métaux lourds et composés radioactifs et suggère que la limite est dépassée.

→ **Augmentation des aérosols dans l'atmosphère.** Cette limite n'a pas été quantifiée à l'échelle de la planète mais en Asie du Sud, l'épaisseur optique des aérosols s'élève à 0,3 - 0,4 au lieu des 0,25 préconisés. L'épaisseur optique répond à une définition très précise en physique. Gardons simplement en mémoire qu'une épaisseur optique nulle est synonyme d'atmosphère totalement claire et limpide et que plus sa valeur est grande, plus l'atmosphère est opaque et qu'avec une valeur de 1, près de 37 % du rayonnement incident est absorbé.

X Un modèle très simplifié d'effet de serre

✚ Modèle à une couche

La loi de Stefan-Boltzmann établit que la puissance rayonnée par l'unité de surface d'un corps (un « corps noir » si l'on veut être précis, mais nous n'allons pas entrer dans les détails) est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température. Ainsi, une étoile deux fois plus chaude qu'une autre émet $2^4 = 16$ fois plus d'énergie. Cette loi est indispensable au calcul de la température d'une planète.

La puissance émise par unité de surface du Soleil, de température T_S , s'écrit donc :

$$P_1^* = \sigma T_S^4$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann valant approximativement $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

La puissance P_1 rayonnée par l'ensemble du Soleil est le produit de la surface du Soleil – la surface d'une sphère de rayon R vaut $4\pi R^2$ – par la puissance rayonnée par unité de surface. Le rayon du Soleil étant noté R_S , elle s'exprime par la formule :

$$P_1 = 4\pi R_S^2 \sigma T_S^4$$

L'application numérique avec $R_S = 695\,700 \text{ km}$ et $T_S = 5\,772 \text{ K}$ donne $P_1 \approx 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

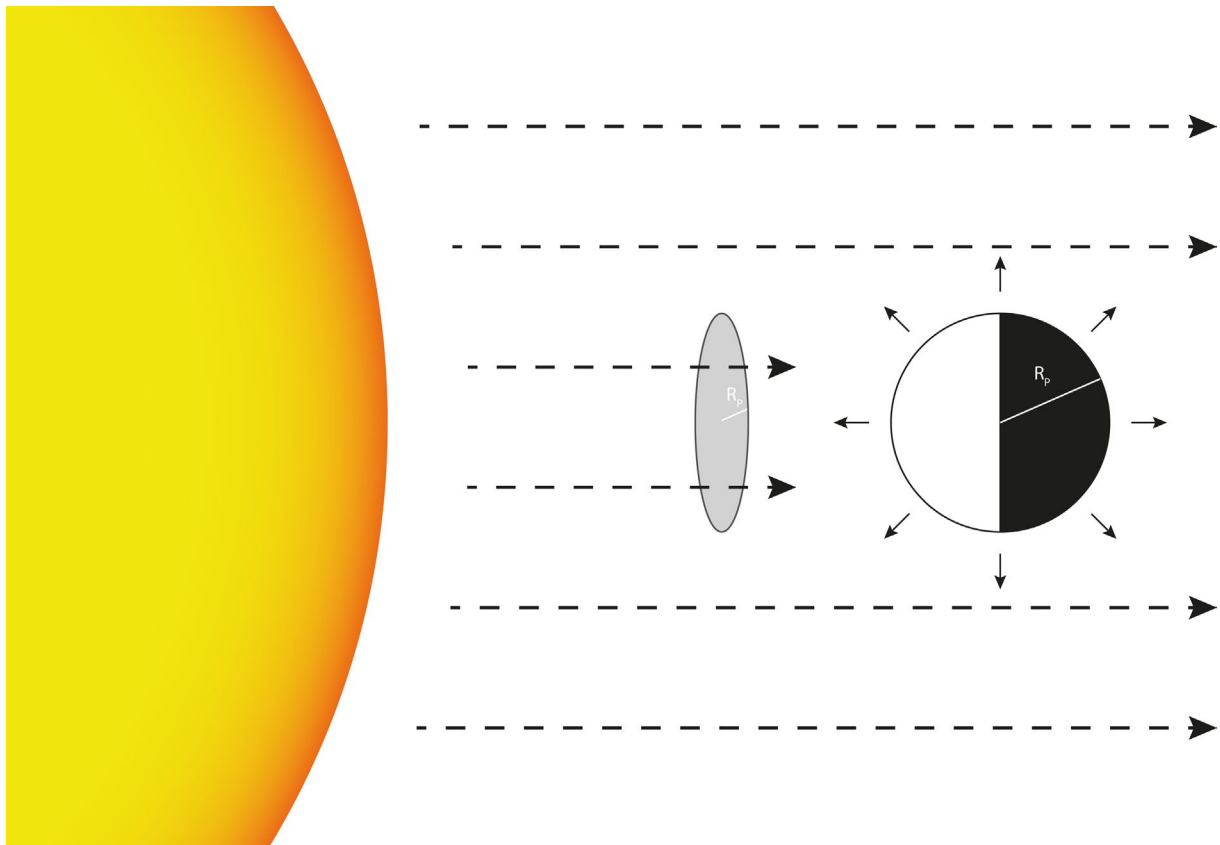
En une seconde, le Soleil émet donc $3,83 \cdot 10^{26} \text{ J}$, plus de 800 000 fois la production énergétique mondiale annuelle sur Terre !

Le rayonnement du Soleil étant isotrope (il présente les mêmes caractéristiques dans toutes les directions), la puissance rayonnée se conserve au fur et à mesure qu'elle chemine dans l'espace : des sphères concentriques successives reçoivent la même puissance. Au niveau de l'orbite d'une planète située à la distance d du Soleil, chaque plaque d'un mètre carré exposée perpendiculairement aux rayons solaires reçoit $\frac{P_1}{4\pi d^2}$.

Cette quantité s'appelle la constante solaire S . Elle vaut environ $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ au niveau de la Terre. Cela représente environ 14 ampoules de 100 W chacune !

Si l'on moyenne cette quantité des pôles à l'équateur, sur toutes les saisons et sur le cycle jour-nuit, on arrive à la conclusion que chaque mètre carré de notre planète reçoit en moyenne 342 W.m^{-2} .

La puissance solaire P_2 captée par une planète est assimilable à celle interceptée par un disque de rayon R_p .



On peut l'exprimer symboliquement par l'équation :

$$P_2 = \frac{P_1}{4\pi d^2} \pi R_p^2 = \frac{4\pi R_s^2 \sigma T_s^4}{4\pi d^2} \pi R_p^2 = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \pi R_p^2$$

Un corps céleste n'absorbe pas totalement ce qu'il reçoit, car sa surface et les nuages réfléchissent une partie de l'énergie solaire incidente. On modélise cette réflexion à l'aide d'un paramètre appelé l'albédo. Un albédo de 1 signifie que le rayonnement incident est intégralement réfléchi ; un albédo de 0 qu'il est entièrement absorbé. À titre d'exemple, la surface d'un lac, très sombre, a un albédo de 0,02 à 0,04 ; une forêt de conifères, de 0,05 à 0,15 ; les nuages de 0,50 à 0,80 ; et la neige fraîche, de 0,75 à 0,90. La puissance effectivement absorbée par une planète dotée d'un albédo A est $P_{abs} = (1 - A)P_2$.

On suppose que la planète est à l'équilibre radiatif : elle réémet exactement la puissance du rayonnement solaire qu'elle a absorbée. De plus, on néglige une éventuelle source d'énergie interne, ce qui est totalement justifié dans le cas des planètes telluriques comme la Terre – le flux de chaleur interne de notre planète ne s'élevant en moyenne qu'à 70-80 mW.m⁻². On a donc $P_{\text{absorbée}} = P_{\text{réémise}}$ avec :

$$P_{\text{absorbée}} = (1 - A)\sigma T_S^4 \left(\frac{R_S}{d}\right)^2 \pi R_P^2$$

$$P_{\text{réémise}} = 4\pi R_P^2 \sigma T_{eq}^4$$

Pour établir la formule donnant $P_{\text{réémise}}$, nous avons supposé que le rayonnement solaire absorbé est redistribué uniformément tout autour de la planète.

Après simplification, il vient :

$$T_{eq} = \left(\frac{1 - A}{4}\right)^{\frac{1}{4}} T_S \sqrt{\frac{R_S}{d}}$$

Appliquons cette formule aux cas des planètes Vénus, Terre et Mars.

Planète	D	Albédo	T _{eq}	T _{mesurée en surface}
Vénus	108,2.10 ⁶ km	0,77	-46,5 °C	460 °C
Terre	149,6.10 ⁶ km	0,306	-19,1 °C	15 °C
Mars	227,9.10 ⁶ km	0,250	-63,3 °C	-60 °C

Les températures d'équilibre diffèrent des températures réelles de surface, légèrement dans le cas de Mars, sensiblement dans le cas terrestre et de manière colossale dans le cas de Vénus. Ces différences ont une cause unique : l'effet de serre, que nous n'avons pas pris en compte, dû à certaines molécules présentes dans l'atmosphère plus ou moins denses de ces trois planètes.

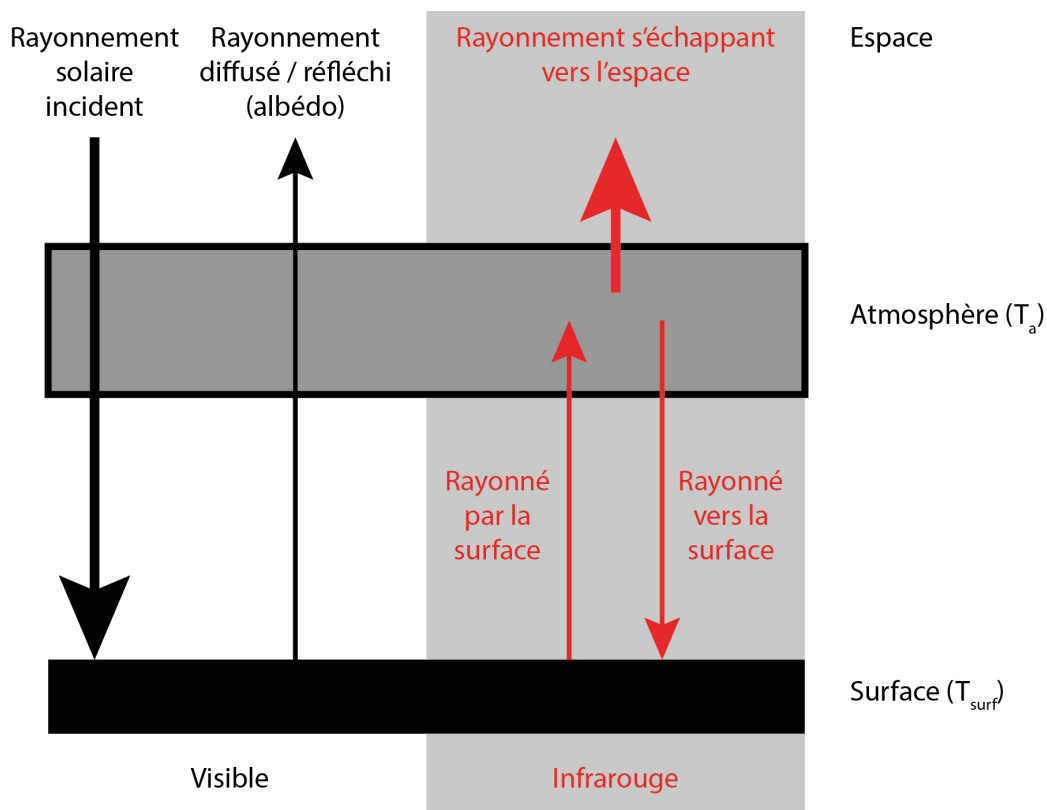
Prenons l'exemple de Vénus. Son épaisse atmosphère (constituée à 96,5 % de CO₂, 3,5 % de N₂ plus d'autres composés en concentrations plus faibles) exerce au niveau du sol une pression de 93 bars, soit plus de 90 fois la pression atmosphérique terrestre. Les couches de nuages blancs composés de gouttelettes d'acide sulfurique (H₂SO₄) qui entourent uniformément la planète réfléchissent environ 70 % du rayonnement solaire dans l'espace. Les 30 % qui arrivent à franchir cette barrière chauffent l'atmosphère et surtout la surface, qui réémettent cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Toutefois, certains composés atmosphériques comme le dioxyde de carbone, le dioxyde de soufre (SO₂) et la vapeur d'eau (H₂O) sont des gaz à effet de serre : pratiquement transparents au rayonnement visible, ils sont opaques au rayonnement infrarouge. La chaleur emmagasinée reste ainsi piégée près de la surface et la porte à une température moyenne de 460 °C.

Sur Mars, dont l'atmosphère est composée à 96 % de CO₂, 1,9 % d'argon (Ar) et 1,9 % de diazote (N₂) plus d'autres composés en faibles concentrations, la pression au sol est beaucoup plus basse : elle se monte en moyenne à 6,4 kPa soit 1/160^e de la pression atmosphérique sur Terre. L'effet de serre est présent mais son intensité est bien moindre.

La Terre est un cas intermédiaire. Beaucoup moins intense que sur Vénus, l'effet de serre permet néanmoins d'y faire passer la température moyenne de - 19 °C à + 15 °C. La vapeur d'eau est son principal contributeur, à une hauteur proche de 60 %. On trouve ensuite le CO₂ (environ 20 %), le méthane CH₄ et l'ozone O₃ troposphérique, tous deux contribuant à un peu moins de 10 % de l'effet de serre total.

🌈 Modèle à plusieurs couches

Le modèle que nous venons de présenter ne comporte qu'une couche, caractérisée par la température T_p . Nous allons le complexifier en introduisant une seconde couche. On suppose donc que tout le flux solaire incident qui n'est pas diffusé ou réfléchi atteint la surface (c'est la première couche), est absorbé, chauffe cette surface puis est réémis vers le haut par elle à des longueurs d'onde plus grandes, dans l'infrarouge. Le flux réémis ascendant est absorbé par la couche supérieure, l'atmosphère, qu'on suppose constituée de molécules émettant et absorbant uniquement dans l'infrarouge. Elle possède une température T_a , tandis que la surface est à la température T_{surf} . L'atmosphère est susceptible d'émettre du rayonnement à la fois vers le bas (vers la surface) et vers le haut (vers l'espace).



L'énergie étant conservée, la puissance du rayonnement qui s'échappe du sommet de l'atmosphère de la planète doit être égale à la puissance du rayonnement solaire incident absorbée. On a donc, cette fois :

$$(1) \quad P_{\text{absorbée}} = (1 - A)\sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \pi R_p^2$$

$$(2) \quad P_{\text{réémission}} = 4\pi R_p^2 \sigma T_a^4$$

L'égalité entre ces deux expressions conduit à une formule tout à fait similaire à celle de la page précédente :

$$T_a = \left(\frac{1 - A}{4}\right)^{\frac{1}{4}} T_s \sqrt{\frac{R_s}{d}}$$

Considérons maintenant la couche inférieure, autrement dit la surface. La puissance P_{tot} qu'elle reçoit par rayonnement a une origine double. Une partie (3) provient directement du Soleil et l'autre partie (4) du flux descendant émis de la couche atmosphérique portée à la température T_a .

$$(3) \quad (1 - A)\sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{d}\right)^2 \pi R_p^2$$

$$(4) \quad 4\pi R_p^2 \sigma T_a^4$$

(3) est identique à (1)... et donc à (2). Ainsi, la puissance totale P_{tot} reçue par la surface, c'est-à-dire (3) + (4), vaut :

$$P_{\text{tot}} = 4\pi R_p^2 \sigma T_a^4 + 4\pi R_p^2 \sigma T_a^4 = 8\pi R_p^2 \sigma T_a^4$$

La surface étant supposée à l'équilibre radiatif, elle émet exactement la quantité d'énergie qu'elle reçoit et il vient :

$$4\pi R_p^2 \sigma T_{\text{surf}}^4 = 8\pi R_p^2 \sigma T_a^4$$

Et donc :

$$T_{\text{surf}} = 2^{1/4} T_a \approx 1,189 T_a$$

Avec les valeurs numériques proposées plus haut, on obtient, pour la Terre, $T_a = -19,1$ °C et $T_{\text{surf}} = 29,0$ °C. La température de surface de la Terre est maintenant surestimée. Pourquoi ? Parce que les hypothèses que nous avons utilisées pour mener à bien le calcul ne sont pas très réalistes :

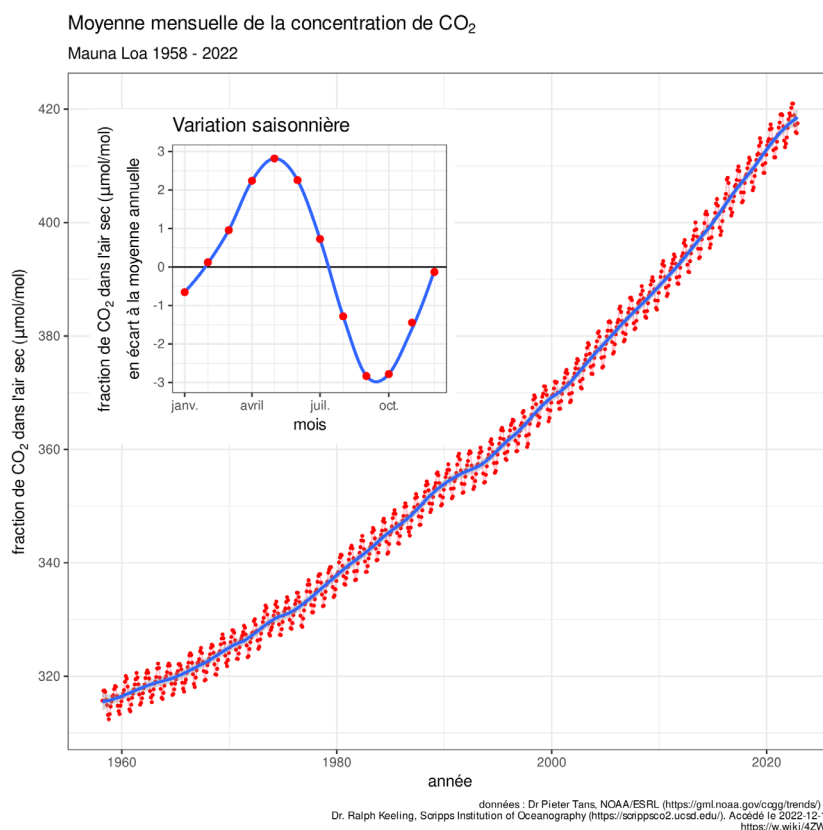
- L'atmosphère n'est pas totalement transparente au rayonnement solaire incident mais en absorbe une partie ;
- En retour, elle n'est pas totalement opaque au rayonnement infrarouge qui monte de la surface ;

- L'absorption et l'émission atmosphériques dépendent beaucoup de la longueur d'onde considérée ;
- L'atmosphère n'a pas une température uniforme T_a mais possède un profil vertical complexe, ce qui modifie l'intensité des absorptions et des émissions ;
- En plus d'être redistribuée par rayonnement, l'énergie l'est aussi par des phénomènes de transport dynamique comme la convection et la turbulence.

L'obtention d'un modèle un peu plus réaliste peut être obtenue en considérant que la couche d'atmosphère n'est pas tout à fait opaque au rayonnement infrarouge émis par la surface. Si nous donnions à la fraction du rayonnement infrarouge absorbé par la couche atmosphérique la valeur α et si nous étendions ce modèle à de nombreuses couches, avec la valeur appropriée pour α dans chaque couche, calculée pour toutes les longueurs d'ondes, en tenant compte des molécules présentes, nous obtiendrions les prémises d'un modèle multicouches à l'équilibre radiatif.

XI CO₂, effet de serre et forçage radiatif

La figure ci-dessous montre, en rouge, l'évolution de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone moyennée sur un mois, de 1958 à aujourd'hui. La courbe en bleu lisse les données pour faire apparaître la tendance générale.



Concentration en CO₂ atmosphérique à Mauna Loa (Hawaï) depuis 1958.

La concentration est exprimée en micromole par mole ($\mu\text{mol/mol}$), une unité équivalente au ppmv (**p**artie **p**ar **m**illion en **v**olume). La tendance générale traduit une hausse constante voire accélérée. Dans le détail, on voit apparaître de petites fluctuations saisonnières mises en valeur par l'encart en haut à gauche. La concentration en CO_2 diminue de 6 à 7 ppmv entre mai et septembre-octobre, pendant la phase de croissance des forêts de l'hémisphère nord. Il croît d'environ 8 à 9 ppmv pendant le reste de l'année, alors que les végétaux entrent en dormance ou meurent et se décomposent. L'hémisphère nord domine le cycle annuel de la teneur atmosphérique en CO_2 puisqu'il concentre les deux tiers des terres émergées de la planète.

- ✚ Augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et augmentation de la température

En climatologie, le forçage radiatif dû à un composé chimique quantifie la tendance qu'il possède à réchauffer l'atmosphère et permet d'estimer ce réchauffement. Il se mesure en watt par mètre carré ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Des codes de transfert radiatif permettant de calculer l'intensité de chaque raie spectrale pour des conditions atmosphériques données permettent d'établir l'absorption infrarouge dont est responsable un composé donné ainsi que le forçage radiatif ΔF en fonction de sa concentration. Les résultats sont souvent présentés sous une forme algébrique, valable en première approximation dans un domaine de concentration pas trop élevée.

Ainsi, le premier rapport d'évaluation du GIEC (*Climate Change. The IPCC Scientific Assessment*, 1990) donne, pour le CO_2 :

$$\Delta F = 6,3 \ln \frac{C}{C_0}$$

où C est la concentration en CO_2 en ppmv et C_0 une valeur de référence. Lorsque l'on étudie le réchauffement climatique, on lui donne généralement la valeur de 278 ppmv, correspondant à la valeur préindustrielle (avant 1750). Cette équation est valable pour $C < 1000$ ppmv. D'autres études ont depuis permis de revoir légèrement à la baisse le coefficient de proportionnalité et la formule suivante est maintenant utilisée dans la littérature scientifique :

$$\Delta F = 5,35 \ln \frac{C}{C_0}$$

Le changement de température ΔT résultant d'un forçage radiatif ΔF vaut $\Delta T = \lambda \Delta F$ où λ est appelée la sensibilité climatique. Une valeur typique de λ , déterminée empiriquement, est $0,8 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^2$.

Intéressons-nous au cas de l'année 2016. La concentration moyenne annuelle en CO_2 atteignait alors 403,3 ppm. Les deux formules donnent successivement $\Delta F = 1,99 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et $\Delta T = 1,6 \text{ K}$. Si l'on inclut, en plus du CO_2 , tous les autres gaz à effet de serre connus – le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), l'ozone (O_3) dans sa partie troposphérique, les chlorofluorocarbures, les hydrofluorocarbures et les hydrochlorofluorocarbures – on obtient

un forçage radiatif de $3,03 \text{ W.m}^{-2}$ (les expressions analytiques donnant le forçage radiatif dû à chacun de ces composés chimiques est disponible ici : <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>), entraînant une augmentation globale de température correspondante de 2,4 K... bien supérieure à l'augmentation observée, d'environ 1,2 K.

Une partie de cette différence est due au décalage temporel entre le forçage et l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre thermique par la Terre. Le reste de la différence pourrait provenir du forçage négatif des aérosols (des particules très fines en suspension dans l'atmosphère issues du volcanisme, des embruns marins, des combustions... qui modifient les propriétés des nuages et refroidissent le climat en augmentant l'albédo), d'une sensibilité climatique inférieure à la valeur communément acceptée, ou d'une combinaison de ces facteurs.

La vapeur d'eau en tant que gaz à effet de serre

La vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre sur Terre. Pourquoi alors n'a-t-on pas focalisé notre attention sur ce composé plutôt que sur le CO_2 ? Parce que la vapeur d'eau agit de manière indirecte et ne fait qu'amplifier l'action du CO_2 : les sources de vapeur d'eau d'origine anthropique, comme les cultures irriguées, n'ont quasiment pas d'impact sur le climat.

En effet, à la différence du CO_2 , libre de s'accumuler eu égard à la pression atmosphérique terrestre relativement faible, la quantité de vapeur d'eau qu'une parcelle d'air peut contenir est limitée. En son sein, la pression partielle de vapeur d'eau ne peut excéder une valeur appelée *pression de vapeur saturante*, qui ne dépend que de la température. Si la pression de la vapeur d'eau dépasse la pression de vapeur saturante, elle condense, devient liquide et mène à la formation de nuages. Ainsi, la vapeur d'eau émise par les activités humaines va finir par condenser puis précipiter : régulée dans les basses couches de l'atmosphère, elle n'y demeure jamais longtemps et a peu d'impact sur l'effet de serre.

Là où le bât blesse, c'est que la pression de vapeur saturante est une fonction strictement croissante de la température. Plus il fait chaud, plus l'atmosphère a la capacité de stocker de la vapeur d'eau, sans que celle-ci ne précipite. Si la température augmente à cause d'émissions anthropiques de CO_2 , l'air peut contenir plus de vapeur d'eau et cette vapeur d'eau additionnelle dans l'air va alors contribuer à l'effet de serre, renforçant le réchauffement initial. Ainsi, la vapeur d'eau va contribuer à amplifier l'effet initial – la hausse de la température – même si elle n'en est pas à l'origine.

À ce sujet, voyez le très bon article de vulgarisation de François-Marie Bréon, physicien-climatologue, chercheur au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (<https://www.lsce.ipsl.fr/>) ici :

https://www.lepoint.fr/environnement/comment-la-vapeur-d-eau-a-un-impact-sur-le-rechauffement-climatique-17-03-2023-2512538_1927.php

✚ En guise de conclusion

Le climat est d'une extrême complexité et nous n'en avons donné ici qu'une vision très partielle et réductrice. Sa modélisation requiert la mise en commun des connaissances issues de la physique, de la chimie, de la mécanique des fluides, de la météorologie, de l'océanographie, de la géophysique, de la glaciologie, de la biologie, de l'astronomie, de la modélisation numérique, du traitement et de l'assimilation des données...

De très nombreux processus intriqués doivent être pris en compte, sur d'immenses échelles de temps et de taille, avec de nombreuses rétroactions positives et négatives. Il faut, à la fois, intégrer les phénomènes submicrométriques de nucléation sur les aérosols, fondamental pour la formation des nuages, et gérer la présence de chaînes de montagnes s'étendant sur des milliers de kilomètres. Il faut, à la fois, travailler sur des phénomènes très brefs et d'autres, caractérisés par des durées beaucoup plus longues, comme l'inertie thermique des océans... et même la dérive des continents sur des dizaines de millions d'années si l'on s'intéresse aux climats lointains passés et futurs de la Terre.

Un défi pour les supercalculateurs les plus puissants de la planète !

La modélisation est donc excessivement difficile mais des progrès remarquables ont été obtenus depuis le premier rapport du GIEC en 1990.

Pour savoir plus en détail ce qu'est un modèle climatique, vous pouvez consulter la page créée dans ce but par l'ingénieur Jean-Marc Jancovici.

<https://jancovici.com/changement-climatique/predire-lavenir/quest-ce-quun-modele-climatique-quels-sont-leurs-premieres-conclusions/>



Informations pratiques

Adresse

Cité des sciences et de l'industrie
30 avenue Corentin-Cariou
75019 Paris
www.cite-sciences.fr

Accès

Métro : Porte de la Villette (Ligne 7)
Bus : 71, 139, 150, 152, 249
Tramway : Porte de la Villette (Ligne 3b)

Horaires d'ouverture

Du mardi au samedi de 10 h à 18 h, le dimanche de 10 h à 19 h.
Fermeture le lundi ainsi que les jours fériés suivants : 1^{er} janvier, 1^{er} mai et 25 décembre.

Élémentaire : 1 gratuité pour 12 entrées payantes

Secondaire : 1 gratuité pour 12 entrées payantes

Tarifs groupe, prix par participant (en vigueur au 1^{er} septembre 2023)
5,50 € (3,50 € pour les établissements en réseau d'éducation prioritaire)

Tout billet acheté donne droit à une entrée au sous-marin *Argonaute* (dans la limite des places disponibles) + un accès aux ateliers et au Planétarium sur réservation.

Réservation groupes

<https://www.cite-sciences.fr/fr/vous-etes/enseignants/votre-sortie-scolaire/infos-pratiques-et-reservation>



resagroupescite@universcience.fr



01 40 05 12 12



Cité des sciences et de l'industrie
Service groupes
30 avenue Corentin-Cariou
75930 Paris Cedex 19