

SimClimat, Quelques exemples d'activités

Camille Risi et Mathilde Tricoire

Le logiciel SimClimat est un logiciel pédagogique de simulation du climat de la Terre et des planètes. Il peut être utilisé en Enseignement Scientifique et en Spécialité SVT en Terminale dans le cadre des nouveaux programmes de lycée pour aborder le rôle de l'espèce humaine dans le réchauffement climatique en cours, les modèles climatiques et les projections climatiques, les rétroactions climatiques, la variabilité glaciaire-interglaciaire et les variations climatiques aux échelles de temps géologiques. Cet article propose 5 exemples d'activités dans lesquelles la démarche scientifique est mise en œuvre avec SimClimat.

Le logiciel SimClimat

Le logiciel SimClimat est un **logiciel pédagogique de simulation du climat** de la Terre et des planètes (Risi, 2015). 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 activer ou désactiver certaines rétroactions climatiques.

Lien avec les programmes de lycée

Les nouveaux programmes de lycée qui sont entrés en vigueur en 2019 en Première et entreront en vigueur en 2020 en Terminale ont renforcé les aspects liés au climat (Risi et al., 2019). SimClimat apparaît alors très pertinent pour aborder 5 thèmes de ce nouveau programme :

1. Le rôle de l'espèce humaine dans le réchauffement climatique en cours (Enseignement scientifique, Terminale)
2. Les modèles climatiques et les projections climatiques (Enseignement scientifique, Terminale)

► **Mots clés** : Modélisation, climat, projection, rétroactions, SVT, paléoclimats.

► **Camille Risi** : Chargée de recherche au CNRS Laboratoire de Météorologie Dynamique, Institut Pierre Simon Laplace, Sorbonne Université

► **Mathilde Tricoire** : Professeure agrégée de SVT, responsable pédagogique à l'Office for Climate Education.

3. Les rétroactions climatiques (Enseignement scientifique, Terminale)
4. La variabilité glaciaire-interglaciaire (Spécialité SVT, Terminale)
5. Les variations climatiques aux échelles de temps géologiques (Spécialité SVT, Terminale).

De plus, le programme mentionne que les lycéens doivent apprendre à « *Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique, en exploitant un logiciel de simulation de celle-ci, ou par la lecture de graphiques.* ». SimClimat est un tel logiciel de simulation.

Nous proposons donc ici une série de fiches suggérant des activités avec SimClimat, une pour chacun des 5 thèmes du programme pour lesquels SimClimat est pertinent. Il ne s'agit pas d'activités « clé-en-main », mais plutôt d'éléments montrant comment SimClimat peut être utilisé pour guider les élèves dans la mise en œuvre d'une démarche scientifique.

Ces fiches peuvent s'utiliser en complément des vidéos de tutoriaux montrant comment utiliser SimClimat, disponibles sur la chaîne Youtube de l'IPSL, et de la documentation du logiciel.

La démarche scientifique et sa mise en œuvre dans le cas d'expériences numériques

Les activités proposées seront présentées pour mettre en valeur les différentes étapes de la **démarche scientifique** :

1. Le constat représente la motivation pour l'activité. Il s'appuiera généralement sur un document annexe ;
2. Le problème scientifique à résoudre découle du constat ;
3. L'hypothèse est une réponse possible à la question, que l'on veut tester ;
4. L' **expérience témoin** permet de vérifier que tout fonctionne comme prévu ;
5. L'expérience de test permet de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse. Attention, on ne modifie qu'un seul paramètre par rapport au témoin, sans quoi on ne pourrait rien conclure ;
6. Les résultats de l'expérience sont décrits et interprétés ;
7. En conclusion, on confirme ou non l'hypothèse et on répond ainsi au problème scientifique posé.

Au cœur de la démarche expérimentale, on a donc des expériences. Dans le cas du climat, comme nous n'avons qu'une seule Terre et que nous ne voulons pas la détruire, nous avons recours à des **expériences virtuelles** par le biais de la **modélisation**.

Le climat est un système très complexe, mettant en interaction de nombreuses composantes : l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales, les glaces. Chacune de ces composantes est elle-même très complexe, avec de nombreux processus en jeu ; par exemple, dans l'atmosphère : les vents, le cycle de l'eau... Face à une telle complexité, la modélisation doit être **numérique**.

Les expériences numériques, appelées **simulations**, s'appuient sur un modèle

numérique. C'est un ensemble d'équations physiques qui sont résolues par un ordinateur. Ainsi, on peut simuler le climat avec un **modèle numérique de climat**. Derrière l'interface graphique de SimClimat se cache en réalité un tel modèle. Ainsi, SimClimat n'est pas juste une animation. Aucun résultat n'est pré-enregistré. Il réalise de véritables simulations en temps réel.

Dans le cas d'une démarche scientifique avec expériences numériques, quelques précautions doivent être prises par rapport à celle avec des expériences de laboratoire classiques. Tout d'abord, il est essentiel que les équations du modèle ne soient pas basées sur le constat ou sur l'hypothèse initiale. Sinon, le raisonnement se mordrait la queue. Il est donc important de rappeler que SimClimat est un véritable modèle basé sur des équations physiques générales. Ensuite, l'expérience témoin doit permettre d'**évaluer le réalisme du modèle**. Il doit au premier ordre reproduire le phénomène que l'on cherche à comprendre.

SimClimat et les modèles de climat utilisés pour le GIEC

Les projections climatiques présentées dans les rapports du **GIEC** (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) se basent sur des simulations avec différents modèles numériques de climat (Boucher et al, 2015). Il existe dans le monde une quarantaine de modèles de climat, dont deux français (modèle de l'Institut Pierre-Simon Laplace en région parisienne et modèle du Centre National de Recherche Météorologique à Toulouse, Dufresne et al, 2006). Ils réalisent tous les mêmes simulations dans le cadre du programme **CMIP** (Coupled Model Intercomparison Project). Chaque simulation correspond à un protocole expérimental strict. Tous les résultats de CMIP sont accessibles librement et gratuitement. Ce sont ces résultats qui alimentent les rapports du GIEC. Par exemple, le 5e rapport du GIEC a été alimenté par CMIP5.

Les modèles de climat participant à **CMIP** sont beaucoup plus complexes que SimClimat. Dans ces modèles de climat, l'atmosphère est divisée en plusieurs millions de petits pixels. Toutes les quelques secondes, les équations de la mécanique des fluides sont résolues numériquement, la circulation de l'atmosphère est simulée et les variables météorologiques sont calculées en chaque pixel. Au contraire, SimClimat considère un bilan d'énergie en moyenne sur toute la Terre et en moyenne sur une ou plusieurs années. Les modèles de climat simulent aussi la circulation dans l'océan, les processus nuageux, la dynamique de la végétation et les processus hydrologiques sur les surfaces continentales, alors que SimClimat les néglige. Ainsi, **SimClimat est basé sur des équations physiques générales, mais très simplifiées**. Cela permet à SimClimat de simuler des millions d'années en quelques secondes, tandis que les modèles de climat participant à CMIP mettent plusieurs semaines à simuler un siècle.

A la fin des trois premières activités, les résultats obtenus avec SimClimat seront comparés à ceux obtenus avec des modèles plus complexes, pour évaluer le degré de confiance qu'on peut leur accorder.

Liens utiles



Lien pour téléchargement

<https://www.lmd.jussieu.fr/~crlmd/sim-climat/>



Documentation

https://www.lmd.jussieu.fr/~crlmd/sim-climat/documentation_2019.pdf



5e rapport du GIEC (2013) : The Physical Science Basis

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>



Vidéo sur la modélisation du climat conçue par l'IPSL

<https://www.youtube.com/watch?v=S5f5dJyvezY&t=76s>



Activité 1

Utilisation de SimClimat pour montrer le rôle de l'Homme dans le réchauffement climatique en cours

Lien avec les programmes

SimClimat permet de mettre en évidence le rôle des activités humaines dans le réchauffement en cours. Il permet donc d'aborder les points suivants :

Savoirs

« L'analyse scientifique combinant observations, éléments théoriques et modélisations numériques permet aujourd'hui de conclure que l'augmentation de température moyenne depuis le début de l'ère industrielle est liée à l'activité humaine : CO₂ ... »

Sim Climat
En. Scientifique
Terminale

Savoir-faire

« Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet »

Attention

SimClimat ne permet pas de séparer les différentes sources de CO₂ mentionnées dans le programme : « produit par la combustion d'hydrocarbures, la déforestation, la production de ciment ».

SimClimat ne permet pas non plus d'aborder les autres gaz à effets de serre que le CO₂ mentionnés dans le programme : « CH₄ produit par les fuites de gaz naturel, la fermentation dans les décharges, certaines activités agricoles ».

Ces aspects peuvent être traités avec des documents annexes, comme ceux fournis par les rapports du GIEC.

Remarque : le rôle de l'Homme dans le réchauffement climatique en cours est aussi au programme de spécialité SVT en Terminale :

Savoirs

« D'environ 1°C en 150 ans, le réchauffement climatique observé au début du XXI^e siècle est corrélé à la perturbation du cycle biogéochimique du carbone par l'émission de gaz à effet de serre liée aux activités humaines »

Sim Climat
Spé SVT
Terminale

Savoir-faire

« Mobiliser les connaissances acquises sur les conséquences des activités humaines sur l'effet de serre et sur le cycle du carbone. ».

Démarche expérimentale

1. Constat

La figure 1 montre l'évolution des anomalies de température globale au cours du dernier millénaire, selon différentes reconstitutions à partir d'archives paléoclimatiques (cernes d'arbres, dates de vendanges...) puis selon des mesures directes. On voit que les différentes reconstitutions ne sont pas toutes exactement d'accord entre elle, mais elles s'accordent sur des variations assez faibles de la température avant 1850. Puis toutes les reconstitutions, ainsi que les mesures directes, s'accordent sur un réchauffement brutal, d'environ 1°C depuis 150 ans.

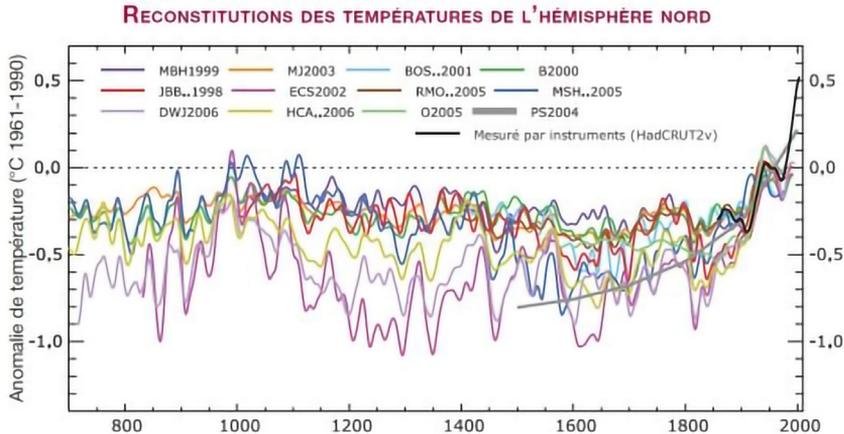


Figure 1 : Evolution des anomalies de température globale au cours du dernier millénaire, selon différentes reconstitutions à partir d'archives paléoclimatiques. Chaque courbe montre un type de reconstitutions. La courbe noire correspond à des mesures directes avec des thermomètres. Figure issue du 4e rapport du GIEC.

2. *Problème posé* : Comment expliquer ce réchauffement?

3. *Hypothèse*

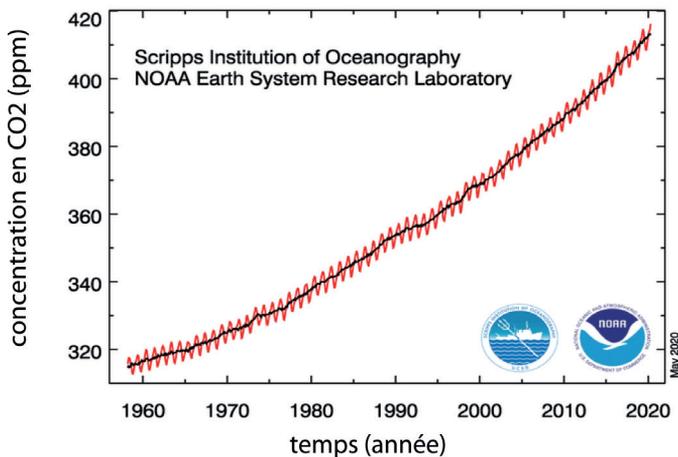


Figure 2 : Évolution de la concentration en CO₂ mesurée depuis 1956 à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Pour la courbe rouge, les données sont moyennées sur un mois, alors que sur la courbe noire, les données sont moyennées sur un an. Figure adaptée de la NOAA.

La figure 2 montre l'évolution de la concentration en CO₂ mesurée à Hawaii depuis 1960. On observe qu'en parallèle du réchauffement climatique, la concentration en CO₂ a augmenté, d'environ 300 ppm en 1960 jusqu'à 415 ppm en 2020. Cette augmentation résulte principalement des émissions par les activités humaines, en particulier par combustion de matière organique fossile. On propose donc comme hypothèse que le réchauffement climatique est causé par cette augmentation de la concentration en CO₂.

4. *Expérience témoin*

Avec SimClimat, on réalise une simulation partant de l'époque préindustrielle, de durée 250 ans, avec des émissions anthropiques de 2,5 GtC/an qui permettent de faire passer la concentration en CO₂ à la concentration actuelle. On vérifie qu'à la fin de la simulation, la température a augmenté de 1°C (figure 3, rouge), ce qui est cohérent avec les observations (figure 1). Notons qu'avec SimClimat, on ne peut pas facilement faire évoluer les émissions anthropiques de CO₂ avec le temps selon un scénario réaliste. Dans ces simulations, seuls le début et la fin de la simulation sont analysés.

5. *Expérience de comparaison*

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, à part que les émissions anthropiques sont nulles.

6. *Résultat*

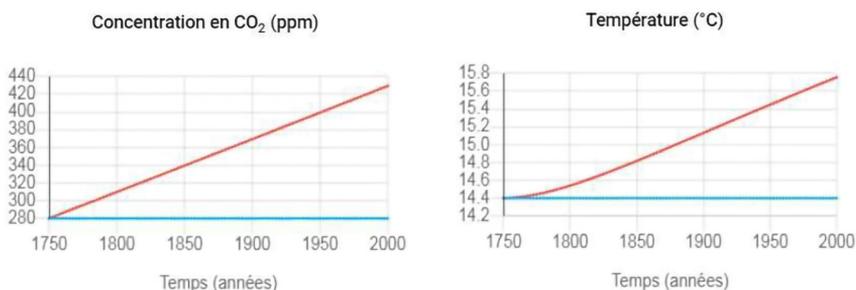


Figure 3 : Copie d'écran des résultats d'une simulation pré-industrielle avec concentration en CO₂ constante (bleu) et avec des émissions anthropiques de carbone de 2,5 Gt/an qui permettent de faire passer la concentration en CO₂ à une concentration semblable à l'actuel (rouge).

On constate que si les émissions anthropiques sont nulles, alors la concentration en CO₂ reste constante, et la température globale n'augmente pas (figure 3, bleu).

7. *Conclusion*

On conclut que le réchauffement climatique observé est bien causé par les émissions humaines de CO₂. Celles-ci entraînent une augmentation de la concentration en CO₂ et donc une augmentation de la température par le biais de l'effet de serre.

Comparaison aux « vrais » modèles de climat

SimClimat permet de mettre en évidence le rôle de l'Homme dans le réchauffement climatique en cours. SimClimat est toutefois basé sur un modèle très simplifié du climat. Les « vrais » modèles de climat, ceux utilisés dans les rapports du GIEC, montrent-ils des résultats cohérents avec SimClimat ?

Dans le cadre du programme CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), tous les modèles de climat ont réalisé les mêmes expériences. Dans l'expérience témoin, les modèles de climat sont soumis à l'augmentation des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre (CO_2 , mais aussi CH_4) observées depuis 150 ans, ainsi qu'à la variation de la concentration en aérosols émis par les volcans. Les simulations reproduisent bien la variabilité interannuelle liée aux éruptions volcaniques, superposée à une tendance au réchauffement d'environ 1°C sur 100 ans (figure 4a).

Dans une deuxième expérience, les modèles de climat sont soumis uniquement à la variation de la concentration en aérosols émis par les volcans. Les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre restent constantes. Les modèles simulent toujours la variabilité interannuelle de la température liée aux éruptions volcaniques, mais ne reproduisent plus la tendance observée au réchauffement (figure 4b). Cela prouve donc que le réchauffement observé depuis 150 ans est bien causé par l'augmentation en gaz à effet de serre.

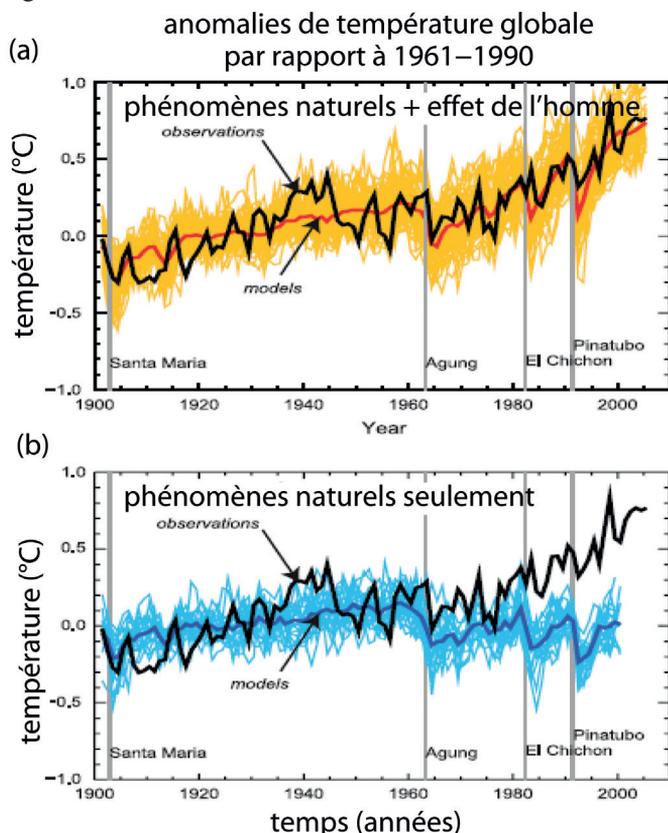


Figure 4 : (a) Évolution de la température globale depuis 1900 pour les observations (noir), en anomalie par rapport à la moyenne sur la période 1901-1950, pour les modèles participant à CMIP (jaune) et pour la moyenne entre tous les modèles de CMIP (rouge), lorsqu'on considère à la fois les phénomènes naturels et l'effet des activités humaines. La concentration en gaz à effet de serre augmente de la même manière que dans les observations. (b) Évolution de la température globale depuis 1900 pour les observations (noir), pour les modèles participant à CMIP (bleu clair) et pour la moyenne entre tous les modèles de CMIP (bleu foncé), lorsqu'on ne considère que les phénomènes naturels. La concentration en gaz à effet de serre reste constante. Les barres verticales représentent les éruptions volcaniques majeures. Figure issue du 5ème rapport du GIEC.

Tutoriel vidéo



https://www.youtube.com/watch?v=yOxoX-j-6LM&list=PLKU3G-23arv-nySWTCsZowu9n_bwWzaHV1&index=4

Activité 2

Utilisation de SimClimat pour aborder les notions de modèles climatiques et de projections climatiques

Lien avec les programmes

SimClimat est un exemple de modèle physique de climat, même s'il est très simplifié par rapport à ceux utilisés pour le GIEC. Il est basé sur des équations physiques. Il permet de faire des projections climatiques en termes de température et de niveau des mers d'ici la fin du siècle, qui sont semblables à celles des modèles de climat présentées dans le rapport du GIEC. Il permet donc d'aborder les points suivants :

Savoirs

« Les modèles climatiques s'appuient sur :

- la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ;
- des méthodes numériques de résolution.

Sim Climat
En. Scientifique
Terminale

Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations in situ et spatiales ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats.

Ces modèles, nombreux et indépendants, réalisent des projections climatiques. Après avoir anticipé les évolutions des dernières décennies, ils estiment les variations climatiques globales et locales à venir sur des décennies ou des siècles.

Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES :

- une augmentation de 1,5 à 5°C de la température moyenne entre 2017 et la fin du XXI^{ème} siècle ;
- une élévation du niveau moyen des océans entre le début du XXI^{ème} siècle et 2100 pouvant atteindre le mètre ».

Savoir-faire

« Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet ».

Attention

Compte tenu de la simplicité du modèle physique, SimClimat ne permet pas d'aborder les impacts suivants du réchauffement climatique :

- « des modifications des régimes de pluie et des événements climatiques extrêmes ;
- une acidification des océans ;
- un impact majeur sur les écosystèmes terrestres et marins ».

Ceux-ci ne peuvent s'étudier qu'à partir de l'analyse de documents issus du rapport du GIEC.

Démarche expérimentale

1. Constat

L'augmentation de la concentration en CO₂ causée par les activités humaines a entraîné une élévation de la température de la Terre d'environ 1°C depuis 150 ans (activité 1).

2. Problème posé

Comment le climat de la Terre va-t-il évoluer dans les 100 prochaines années ?

La température va-t-elle continuer à augmenter ?

3. Hypothèse

L'évolution du climat à l'avenir dépend de la quantité de gaz à effet de serre émise par les activités humaines. On peut imaginer que les émissions de CO₂ resteront constantes. On peut aussi imaginer qu'à cause de la croissance démographique et de l'amélioration du niveau de vie dans le monde, les émissions continueront à augmenter. On peut au contraire imaginer que face à l'ampleur aux risques liés au réchauffement climatique, les gouvernements des différents états prendront des mesures drastiques pour limiter les émissions.

4. Expérience témoin

On démarre une simulation « maintenant » d'une durée de 100 ans. On laisse les émissions comme à l'actuel (environ 8 Gt de carbone par an). On constate que la concentration en CO₂ continue d'augmenter (figure 1 violet). En conséquence, la température continue d'augmenter et le réchauffement atteint environ 1,5°C au bout de 100 ans. C'est à cause de l'effet de serre. On constate aussi que le niveau de la mer continue d'augmenter. C'est principalement à cause de la dilatation thermique des océans.

Notons que dans le cas des projections climatiques, il est impossible d'évaluer le réalisme de la simulation, puisqu'il n'existe pas encore d'observations pour la période future.

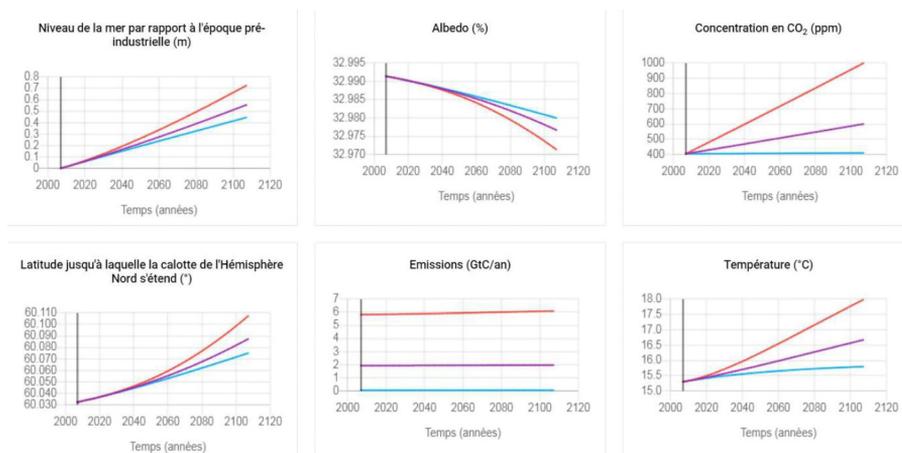


Figure 1 : Copie d'écran de la page d'affichage des résultats de SimClimat montrant 3 projections climatiques de 100 ans, selon 3 scénarios d'émission différents : émissions identiques à l'actuel (violet), triples (24 Gt/an de carbone, rouge) et nulles (bleu).

5. Expérience de test

On ajoute deux simulations identiques à l'expérience témoin, mais pour la première, les émissions anthropiques de CO₂ sont le triple (24 Gt de carbone par an) des émissions actuelles (scénario de développement démographique et économique important), et pour la deuxième, elles sont nulles (scénario où les émissions anthropiques sont stoppées).

6. Résultats

Plus les émissions anthropiques sont fortes, plus la concentration en CO₂ augmente rapidement (figure 1 rouge). La température augmente aussi plus rapidement. Le réchauffement atteint presque 3°C au bout de 100 ans. L'élévation du niveau des mers est lui aussi amplifié. Il atteint 70 cm au bout de 100 ans.

Au contraire, quand les émissions sont nulles, la température augmente peu (figure 1 bleu). Elle augmente malgré de quelques dixièmes de °C, à cause de l'inertie du système climatique.

7. Conclusion

On conclut que l'évolution future du climat dépend du comportement futur des humains et s'ils prennent ou non des mesures pour limiter les émissions de gaz à effets de serre. Ce comportement et les choix de société liés ne sont pas prévisibles. On ne peut donc pas réaliser de « prévisions climatiques ». On élabore plutôt différents scénarios d'émissions de CO₂, qui résultent de différents choix de société. Les scénarios les plus émetteurs sont dits « pessimistes », et les scénarios les moins émetteurs sont dits « optimistes ». La « prévision » du climat pour un scénario d'émission donné s'appelle une **projection climatique**.

Comparaison aux projections du GIEC

Les projections climatiques présentées dans les rapports du GIEC se basent sur des simulations avec différents modèles de climat beaucoup plus complexes que SimClimat.

La figure 2 montre les projections de la température (b) et du niveau des mers (c), pour différents scénarios d'évolution de la concentration en CO₂ (a). Dans le scénario le plus pessimiste, la température augmente d'environ 4°C d'ici 2100, et le niveau de la mer augmente d'environ 70 cm. On constate donc que malgré la simplicité du modèle SimClimat, les ordres de grandeur du réchauffement et de l'élévation du niveau des mers qu'il simule sont semblables à ceux simulés par les « vrais » modèles de climat.

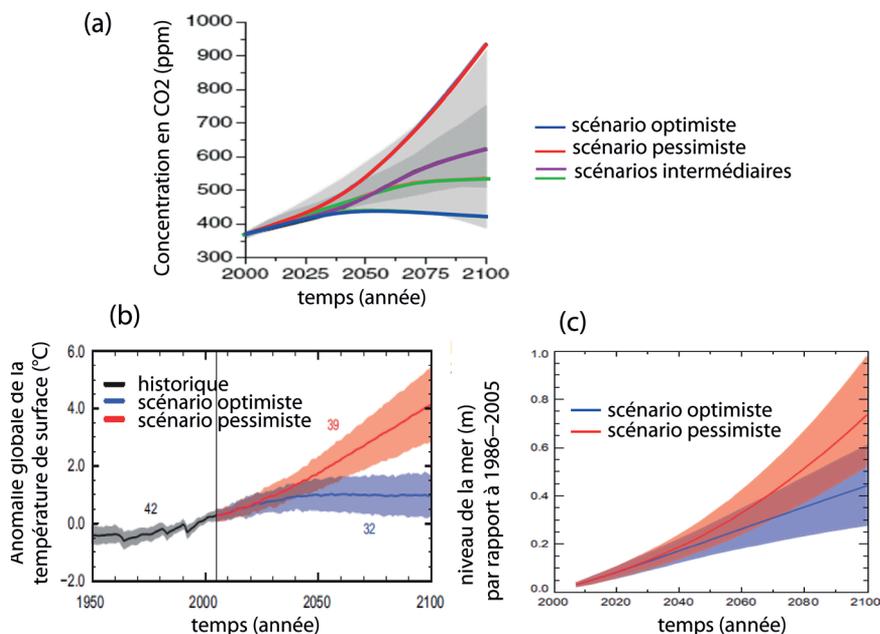


Figure 2 : Projections produites par les modèles participant à CMIP. (a) Différents scénarios d'évolution de la concentration en CO₂. Les scénarios optimiste (bleu), pessimiste (rouge) et intermédiaire (vert) sont comparables aux scénarios choisis avec SimClimat (figure 1). (b) Les traits gras indiquent l'anomalie de la température de surface en moyenne sur la Terre, simulée en moyenne sur les différents modèles de climat pour les scénarios optimiste (bleu) et pessimiste (rouge). L'enveloppe autour des traits gras correspondent à l'ensemble des valeurs simulées par les différents modèles. (c) Comme pour (b) mais pour l'anomalie du niveau de la mer. Figure adaptée du 5e rapport du GIEC.

Tutoriel vidéo



https://www.youtube.com/watch?v=D4VByEbJAK4&list=PLKU3G-23arv-nySWTCsZowu9n_bwWzaHV1&

Activité 3

Utilisation de SimClimat pour mettre en évidence et quantifier les rétroactions climatiques impliquées dans le réchauffement climatique en cours

Lien avec le programme

SimClimat permet de brancher ou débrancher certaines rétroactions climatiques, dont celles de la vapeur d'eau et de l'albédo des glaces, pour les mettre en évidence et en quantifier leur effet. Il permet donc d'aborder les points suivants :

Savoirs

« L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont :

- l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ;
- la décroissance de la surface couverte par les glaces et diminution de l'albédo terrestre ».

Sim Climat
En. Scientifique
Terminale

Savoir-faire

« Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système.

Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet. ».

Attention

Comme SimClimat ne contient pas de représentation du méthane, il ne permet pas d'aborder la possible rétroaction liée au méthane mentionnée dans le "savoirs" suivant :

- « le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère ».

Démarche scientifique

1. Constat

Nous avons vu dans l'activité 1 que le réchauffement climatique était causé principalement par l'augmentation de la concentration en CO₂ lié aux activités humaines, de 280 ppm à l'époque préindustrielle à 400 ppm actuellement. Le CO₂ est un gaz à effet de serre : plus sa concentration augmente, moins les rayons infra-rouges émis par la terre parviennent à s'échapper vers l'espace. La Terre conserve alors plus d'énergie et se réchauffe. On appelle cela l'effet de serre.

2. Problème posé

Avec des calculs simples, il est possible d'estimer l'augmentation de l'effet de serre lié à l'augmentation de la concentration en CO₂ de 280 ppm à 400 ppm, et en déduire le réchauffement attendu. On trouve alors un réchauffement inférieur à 0,5°C. Dès lors, comment expliquer que la Terre se soit réchauffée de 1°C ?

A. Effet de la vapeur d'eau

3. Hypothèse

A l'état naturel, le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau. Or l'air contient d'autant plus de vapeur d'eau qu'il est chaud (Spiga, 2015). Pour faire introduire cette notion, on partit d'expériences simples sur l'évaporation et la condensation. Par exemple, quand on souffle dehors alors qu'il fait froid, un nuage de gouttelettes d'eau se forme : c'est parce que l'air chaud dans notre bouche contenait beaucoup de vapeur d'eau ; quand cette vapeur d'eau se retrouve dans un air froid, elle se condense, jusqu'à ce que l'air froid ne contienne qu'une petite quantité de vapeur d'eau.

A partir du constat qu'un air chaud peut contenir plus de vapeur d'eau qu'un air froid, on peut demander aux élèves ce qui, selon eux, va se produire du fait du réchauffement de l'atmosphère, et d'imaginer ce « cercle vicieux » avec les conséquences sur le système climatique : plus il fait chaud, plus la concentration en vapeur d'eau augmente, plus l'effet de serre est fort et donc plus il fait chaud (figure 1). On appelle cela une **rétroaction positive**. On essaye donc de tester l'hypothèse selon laquelle la vapeur d'eau est impliquée dans une rétroaction positive qui amplifie le réchauffement climatique.

La rétroaction de la vapeur d'eau:

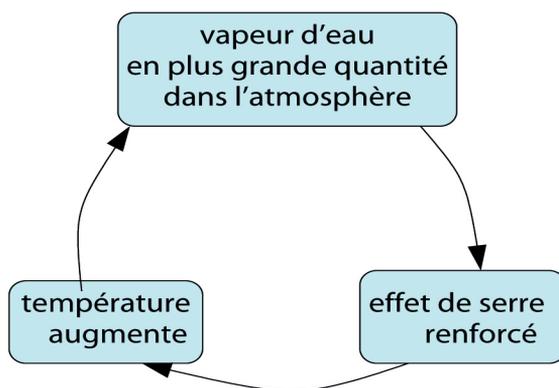


Figure 1 : schéma de la rétroaction positive de la vapeur d'eau

4. Expérience témoin

On réalise une simulation de 250 ans partant du monde préindustriel à aujourd'hui, avec des émissions anthropiques de 2,5 GtC/an qui permettent de faire passer la concentration en CO₂ à la concentration actuelle. On vérifie qu'à la fin de la simulation, la température a augmenté de 1°C (figure 2, rouge), ce qui est cohérent avec les observations.

Température (°C)

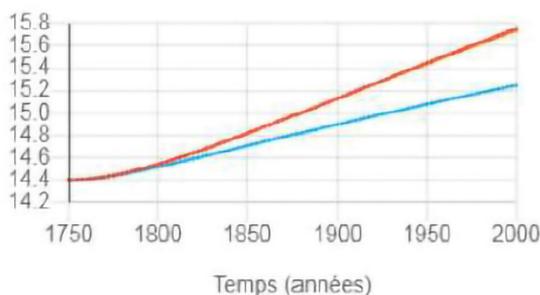


Figure 2 : Copie d'écran des résultats d'une simulation pré-industrielle avec des émissions anthropiques qui permettent de faire passer la concentration en CO_2 à la concentration actuelle (rouge). La simulation bleue est identique à la rouge, sauf que la rétroaction de la vapeur d'eau a été désactivée en maintenant constante la concentration en vapeur d'eau. La simulation jaune est identique à la rouge, sauf que la rétroaction de l'albédo des glaces a été désactivée en maintenant constant l'albédo. La courbe jaune est difficile à voir car elle est située juste sous la courbe rouge.

5. Expérience de test

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, à part qu'on désactive la rétroaction de la vapeur d'eau, en maintenant la concentration en vapeur d'eau constante.

6. Résultats

Si la concentration en vapeur d'eau reste constante, la température globale augmente moins : de $0,6^\circ\text{C}$ au lieu de 1°C (figure 2, bleu).

7. Conclusion

On conclut que la vapeur d'eau est impliquée dans une rétroaction positive qui contribue pour environ 40% au réchauffement climatique.

B. Effet de l'albédo des glaces

3. Hypothèse

L'énergie de la Terre provient du rayonnement solaire. Quand le rayonnement solaire arrive sur la Terre, une partie est réfléchi vers l'espace et est définitivement perdue, et une autre partie est absorbée par la Terre. On appelle albédo la fraction du rayonnement solaire qui est réfléchi. Plus l'albédo est faible, plus la Terre absorbe de l'énergie et plus la température est chaude. Cette notion est au programme d'enseignement scientifique de la classe de première.

On peut alors faire réfléchir les élèves sur l'albédo de différents types de surface terrestres. Quel type de surface a l'albédo le plus faible ? C'est la glace. L'albédo de la planète dépend donc fortement de l'étendue des glaces. A partir de ce constat, on peut imaginer une boucle de rétroaction positive. Plus il fait chaud, plus les glaces fondent, donc plus l'albédo diminue, donc plus la Terre se réchauffe (figure 3).

La rétroaction de l'albédo des glaces:

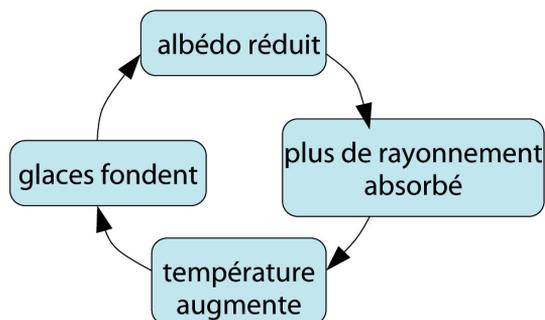


Figure 3 : schéma de la rétroaction positive de l'albédo des glaces

4. *Expérience témoin* : la même que précédemment (figure 2, rouge).

5. *Expérience de comparaison*

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, à part qu'on désactive la rétroaction de l'albédo des glaces, en maintenant l'albédo constant à sa valeur préindustrielle.

6. *Résultats*

Si l'albédo reste constant, la température globale augmente un tout petit peu moins (figure 2, vert).

7. *Conclusion*

On conclut que l'albédo des glaces est impliqué dans une rétroaction positive, mais qui contribue très peu au réchauffement climatique actuel. Cette faible contribution s'explique par le fait que SimClimat prend principalement en compte l'albédo des calottes de glace et peu l'albédo de la neige. Or les calottes évoluent à une échelle de temps longue, sur plusieurs siècles. Si on prolongeait la simulation de plusieurs siècles, on se rendrait compte que la rétroaction de l'albédo des glaces deviendrait la rétroaction dominante.

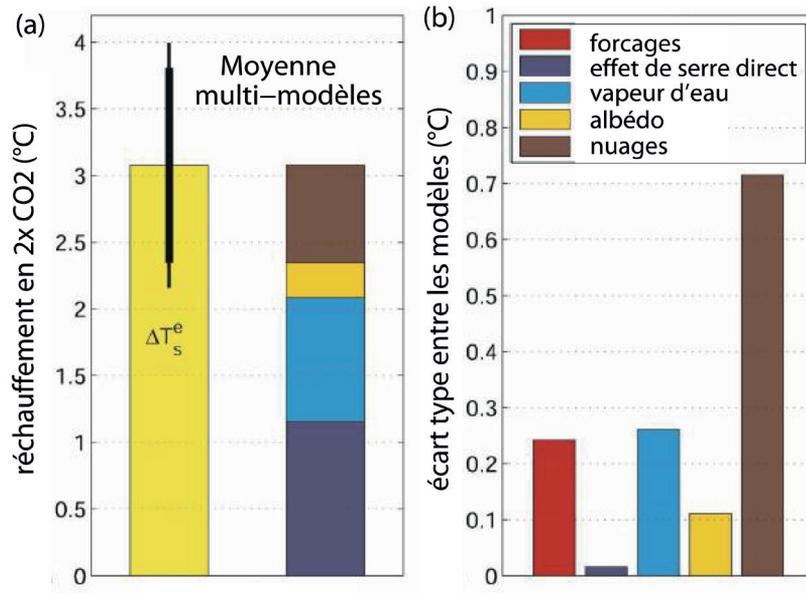
Comparaison aux résultats issus de « vrais » modèles de climat

Comme SimClimat, les « vrais » modèles de climat peuvent être utilisés pour quantifier les différentes rétroactions en jeu dans le réchauffement climatique actuel. La figure 4 montre les résultats d'une telle étude (Dufresne et Bony, 2008). Les différents modèles de climat qui participaient à l'époque au programme CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) ont tous été soumis à un doublement de la concentration en CO₂. L'augmentation de la température globale simulée par les modèles de climat a été décomposée en l'effet de plusieurs processus: (1) l'effet de serre directement lié au CO₂ (violet), la rétroaction de la vapeur d'eau (bleu), la rétroaction de l'albédo des glaces (jaune), et les rétroactions liées aux nuages (marron).

On voit que dans les modèles de climat de CMIP, environ un tiers du réchauffement simulé est causé par l'effet direct du CO₂. La rétroaction de la vapeur d'eau contribue également pour environ un tiers. La rétroaction des glaces contribue entre

5 et 10% au réchauffement. Ces proportions sont assez bien reproduites par SimClimat, même s'il surestime légèrement la rétroaction de la vapeur d'eau et sous-estime celle de l'albédo (figure 2).

SimClimat ne représente pas les rétroactions liées aux nuages, qui comptent pour près du quart du réchauffement dans les modèles de climat de CMIP. Cette rétroaction a été ignorée dans SimClimat car elle est frappée d'une forte incertitude (Risi et Bony, 2019). Sur la figure 4b, on voit l'écart type des différentes contributions au réchauffement simulées par les modèles de climat. Cela permet d'estimer le degré d'accord entre les modèles. On voit que l'écart type est très faible pour l'effet de serre direct du CO₂. Cela veut dire que tous les modèles sont d'accord sur cet effet et le simulent avec beaucoup de précision. L'écart type est un peu plus fort pour la rétroaction de la vapeur d'eau (environ 0,25°C pour une moyenne de 0,9°C). Cela veut dire que cette rétroaction est simulée de manière un petit peu moins précise. L'écart type est d'environ 0,1°C pour la rétroaction de l'albédo des glaces, pour une moyenne de 0,2°C : cela veut dire que cette rétroaction varie du simple au triple selon les modèles. Cette rétroaction est donc simulée de manière peu précise, mais tous les modèles s'accordent tout de même sur le signe positif de cette rétroaction. Enfin, l'écart type est d'environ 0,7°C pour la rétroaction des nuages, pour une moyenne du même ordre de grandeur. Cela veut dire que cette rétroaction est simulée de manière très peu précise par les modèles de climat, qui ne s'accordent même pas tous sur son signe. C'est actuellement la principale source d'incertitude dans les projections climatiques présentées dans les rapports du GIEC pour un scénario donné.



Dufresne et Bony 2008

Figure 4 : (a, gauche) Réchauffement climatique simulé par les différents modèles de climat en réponse à un doublement de la concentration en CO₂. La boîte jaune indique la moyenne entre tous les modèles tandis que la barre d'erreur indique l'écart type entre les différents modèles. (a, droite) Contributions au réchauffement simulé par la moyenne des modèles de climat. (b) Écart type des différentes contributions au réchauffement simulées par les différents modèles de climat. D'après Dufresne et Bony (2008).

Tutoriel vidéo



https://www.youtube.com/watch?v=D4VByEbJAK4&list=PLKU3G-23arvnySWTCsZowu9n_bwWzaHV1&index=3

Activité 4

Utilisation de SimClimat pour identifier les mécanismes de la variabilité glaciaire- interglaciaire

Lien avec le programme

SimClimat permet d'expliquer comment les variations des paramètres orbitaux induisent des variations de la température globale, et permet de mettre en évidence les rôles cruciaux des rétroactions de l'albédo des glaces et de la solubilité de l'océan. Il permet donc d'aborder les points suivants :

Savoirs

« Les rapports isotopiques montrent des variations cycliques coïncidant avec des variations périodiques des paramètres orbitaux de la Terre. Celles-ci ont modifié la puissance solaire reçue et ont été accompagnées de boucles de rétroactions positives et négatives (albédo lié à l'asymétrie des masses continentales dans les deux hémisphères, solubilité océanique du CO₂) ; elles sont à l'origine des entrées et des sorties de glaciation.»

SimClimat
Spé SVT
Terminale

Savoir-faire

- « Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.
- Mettre les variations temporelles des paramètres orbitaux, définis par Milankovich, en relation avec les variations cycliques des températures au Quaternaire.»

Démarche expérimentale

1. Constat

La figure 1 montre l'évolution de la température en Antarctique reconstruite à partir de la composition isotopique de la glace issue d'un forage à Vostok. On

y voit une forte variabilité de la température, avec des périodes chaudes tous les 100 000 ans, appelées interglaciaires, entrecoupées de périodes plus froides (d'environ 10°C), appelées périodes glaciaires (Masson-Delmotte et al 2002, 2015). Depuis 10 000 ans, nous sommes en période interglaciaire. Le dernier maximum glaciaire était il y a 21 000 ans. Des reconstitutions de températures dans d'autres régions du monde, combinées à des archives sédimentaires, montrent qu'au dernier maximum glaciaire, la température globale était 5°C plus basse, une calotte polaire recouvrait toute l'Europe du Nord, et le niveau de la mer était 130 m plus bas.

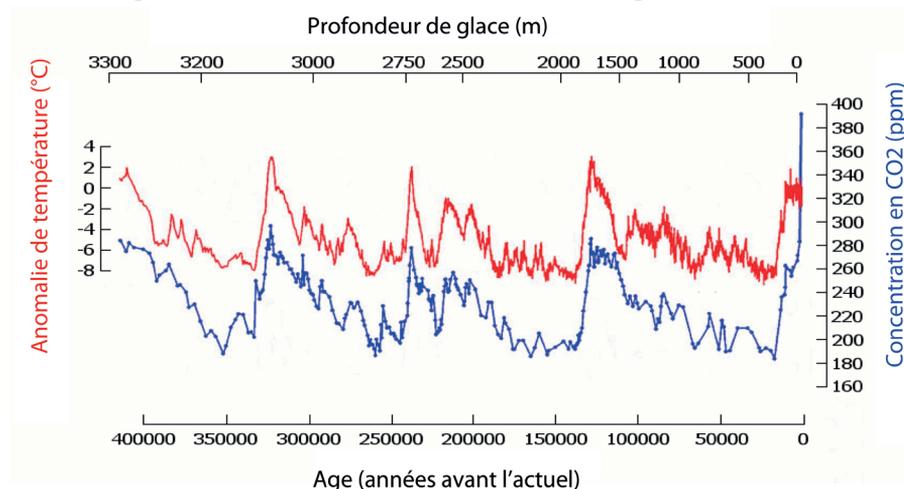


Figure 1: Rouge : évolution de la température reconstituée à partir de la composition isotopique de la glace extraite à Vostok en Antarctique. Bleu : évolution de la concentration en CO₂ enregistrée dans les bulles de glace à Vostok. D'après Petit et al. (1999).

2. Problème posé

Comment peut-on expliquer ces variations glaciaires-interglaciaires de température ? Nous proposons ici une démarche en trois étapes pour comprendre ces mécanismes.

Étape 1: mise en évidence du rôle des paramètres orbitaux

3. Hypothèse

Les échelles de temps des variations de température au cours des variations glaciaires-interglaciaires sont du même ordre de grandeur que celles des paramètres orbitaux : obliquité (environ 40 000 ans), précession (environ 20 000 ans), excentricité (environ 400 000 ans). On propose donc l'hypothèse que des variations des paramètres orbitaux peuvent conduire à des variations de température cohérente avec celles observées lors des cycles glaciaire-interglaciaires (environ 5°C).

4. Expérience témoin

On réalise une simulation de 100 000 ans partant du monde pré-industriel, tous les paramètres étant laissés à leur valeurs par défaut. Une simulation suffisamment longue est nécessaire pour que les calottes de glace aient le temps de s'équilibrer. On voit que la température reste bien constante à une valeur cohérente avec la température globale observée (figure 2, rouge).

5. Expérience de test

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, mais en mettant l'obliquité à sa valeur minimale (figure 2, bleu).

6. Résultats

La température diminue de plusieurs °C. On observe aussi une forte augmentation de l'extension des calottes et une diminution du niveau de la mer du même ordre de grandeur que lors d'une période glaciaire.

7. Conclusion

On conclut que les variations d'obliquité peuvent induire des variations de température cohérente avec celles observées lors des cycles glaciaire-interglaciaires. La même approche peut s'appliquer aux autres paramètres orbitaux.

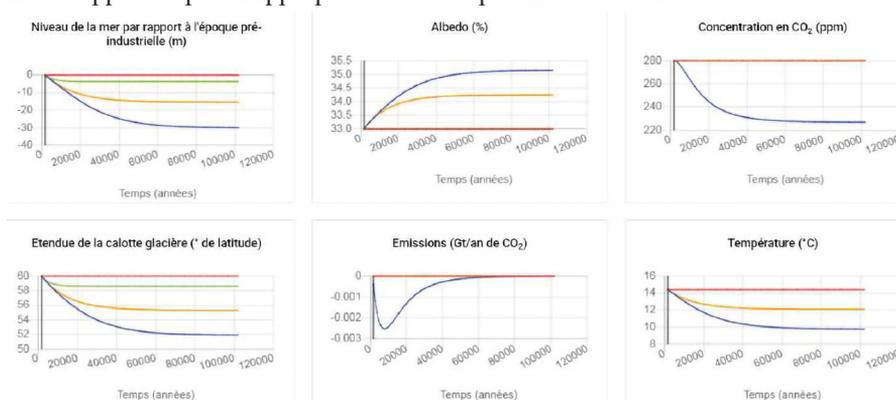


Figure 2 : Copie d'écran des résultats d'une simulation préindustrielle de contrôle de 100 000 ans (rouge), avec une obliquité minimale (bleu), avec obliquité minimale et albédo constant (vert) et avec obliquité minimale et solubilité du CO₂ dans l'océan ne dépendant pas de la température (jaune). Notons que dans les panels où les courbes verte et jaune sont invisibles, elles sont en fait cachées par la courbe rouge.

Étape 2: Mise en évidence du rôle de l'insolation dans les régions polaires en été

1. Constat

Quand on modifie les paramètres orbitaux, on ne modifie pas l'énergie solaire reçue en moyenne sur la Terre sur une année. Les paramètres orbitaux ne font que modifier la distribution de l'énergie reçue en fonction de la latitude et de la saison.

2. Problème posé

Comment alors expliquer que les paramètres orbitaux peuvent modifier la température globale?

3. Hypothèse

En agissant sur l'énergie reçue dans les régions polaires en été, les paramètres orbitaux agissent sur la fonte des calottes polaires. Or la glace réfléchit le rayonnement solaire. On appelle albédo la fraction du rayonnement solaire qui est réfléchi par la Terre. Plus l'étendue des calottes est grande, plus l'albédo est grand, plus le rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace et donc plus la Terre est froide. On

propose l'hypothèse que les paramètres orbitaux agissent sur l'étendue des calottes polaires, donc sur l'albédo de la planète et donc sur la température.

4. Expérience témoin

On utilise l'expérience précédente de 100 000 ans avec l'obliquité minimale (figure 2, bleu). La température diminue bien comme si on entrait dans une nouvelle ère glaciaire.

5. Expérience de test

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, mais en désactivant la rétroaction de l'albédo, c'est-à-dire en fixant l'albédo constant (figure 2, vert).

6. Résultats

La température reste constante.

7. Conclusion

On conclut que c'est bien la modification de l'albédo qui induit la modification de la température quand l'obliquité diminue. Quand l'obliquité diminue, les rayons du Soleil arrivent de manière plus inclinée dans les régions polaires de l'Hémisphère Nord en été. Cela défavorise la fonte de la calotte polaire de l'Hémisphère Nord, et donc favorise son extension. Cela augmente l'albédo de la planète et donc diminue la température.

Notons que ce qui est important ici est l'énergie reçue par la calotte de l'Hémisphère Nord et non celle de l'Hémisphère Sud. En effet, la calotte de l'Hémisphère Nord a toute la liberté pour s'étendre sur l'Europe, la Sibérie et l'Amérique du Nord. Au contraire, la calotte de l'Hémisphère Sud est limitée au continent Antarctique et ne peut pas s'étendre sur l'océan Austral.

Le même mécanisme s'applique aux autres paramètres orbitaux. L'obliquité est choisie ici car c'est le paramètre dont l'effet est le plus facile à comprendre.

Étape 3: pourquoi la concentration en CO₂ diminue-t-elle en période glaciaire?

1. Constat

Les bulles d'air emprisonnées dans les glaces indiquent que les variations de la concentration en CO₂ varient de concert avec la température lors des variations glaciaires-interglaciaires (figure 1, bleu). Quand la température diminue, la concentration en CO₂ diminue. Au dernier maximum glaciaire, la concentration en CO₂ était 100 ppm plus faible pour une température globale 5°C plus faible.

2. Problème posé

Comment expliquer cette diminution de la concentration en CO₂ ?

3. Hypothèse

Quand les océans sont plus froids, le CO₂ s'y solubilise plus facilement. Pour introduire cette idée, on peut présenter un document sur la solubilité du CO₂ en fonction de la température, ou réaliser une petite expérience mettant en évidence la dissolution du CO₂ en fonction de la température.

4. Expérience témoin

L'expérience précédente de 100 000 ans avec l'obliquité minimale (figure 2, bleu). On voit que la concentration en CO₂ simulée par SimClimat diminue de concert avec la température, jusqu'à des valeurs du même ordre de grandeur que celles observées au dernier maximum glaciaire.

5. Expérience de test

On réalise une simulation identique à celle de contrôle, mais en maintenant la solubilité du CO₂ constante quelque soit la température (figure 2, jaune).

6. Résultats

On constate que la concentration en CO₂ reste constante. De plus, la diminution de la température se trouve réduite.

7. Conclusion

Plus les océans sont froids, plus la solubilité du CO₂ est forte. Une partie du CO₂ atmosphérique passe donc sous forme dissoute dans l'océan, ce qui fait diminuer la concentration atmosphérique en CO₂. Comme le CO₂ est un gaz à effet de serre, la diminution de sa concentration atmosphérique amplifie le refroidissement: c'est une rétroaction positive.

Discussion

Dans le cadre du programme CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), tous les modèles de climat doivent réaliser des simulations de périodes passées. Le dernier maximum glaciaire fait partie des périodes à simuler en priorité. Les modèles de climat sont forcés par les calottes polaires et par les concentrations en gaz à effet de serre issus de reconstitutions. Tous les modèles de climat sont alors capables de simuler un refroidissement (figure 3), même si tous ne s'accordent pas sur l'amplitude exacte de ce refroidissement.

Dans les projections climatiques présentées dans les rapports du GIEC, tous les modèles de climat s'accordent pour simuler un réchauffement en réponse à l'augmentation récente des concentrations en gaz à effet de serre. Mais ils ne s'accordent pas tous sur l'amplitude exacte de ce réchauffement, car ils ne simulent pas tous de la même façon les rétroactions climatiques (activité 3). Comment savoir quel modèle est le plus crédible ? La capacité des modèles à simuler des changements climatiques passés informe-t-elle sur leur capacité à simuler les changements futurs ? C'est un sujet très actif de recherche.

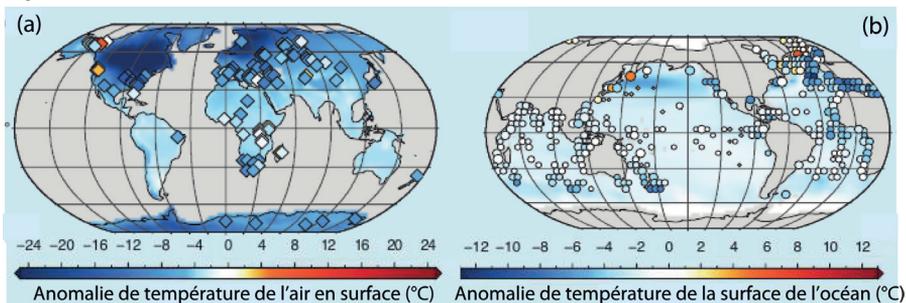


Figure 3 : Température de surface sur continents (a) et océans (b) simulée en moyenne par les différents modèles de climat participant à CMIP au dernier maximum glaciaire, en anomalie par rapport au climat préindustriel. Les marqueurs indiquent les anomalies de températures reconstituées grâce à différents archives paléoclimatiques. Figure adaptée du 5e rapport du GIEC.

Tutoriel vidéo



https://www.youtube.com/watch?v=MRoIT6umsJc&list=PLKU3G-23arvnySWTCsZowu9n_bwWzaHV1&index=2

Activité 5

Utilisation de SimClimat pour identifier les facteurs contrôlant les variations climatiques aux échelles de temps géologiques (Spécialité SVT, Terminale)

Lien avec le programme

SimClimat permet de faire varier plusieurs sources et puits de CO₂ qui ont joué un rôle clé dans les variations climatiques passées aux échelles de temps géologiques. On peut en particulier faire varier le volcanisme et l'activité des dorsales, l'altération continentale, et le stockage biologique. Il permet donc d'aborder les points suivants :

Savoirs

- « Globalement, à l'échelle du Cénozoïque, et depuis 30 millions d'années, les indices géochimiques des sédiments marins montrent une tendance générale à la baisse de température moyenne du globe.
- Celle-ci apparaît associée à une baisse de la concentration atmosphérique de CO₂ en relation avec l'altération des matériaux continentaux, notamment à la suite des orogénèses du Tertiaire. (...)
- Au Mésozoïque, pendant le Crétacé, les variations climatiques se manifestent par une tendance à une hausse de température. Du fait de l'augmentation de l'activité des dorsales, la géodynamique terrestre interne semble principalement responsable de ces variations.
- Au Paléozoïque, des indices paléontologiques et géologiques, corrélés à l'échelle planétaire et tenant compte des paléolatitudes, révèlent une importante glaciation au Carbonifère-Permien. Par la modification du cycle géochimique du carbone qu'elles ont entraînée, l'altération de la chaîne hercynienne et la fossilisation importante de matière organique (grands gisements carbonés) sont tenues pour responsables de cette glaciation ».

Sim Climat
Spé SVT
Terminale

Savoir-faire

- « Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.
- Utiliser les connaissances acquises sur la géodynamique interne et la tectonique des plaques pour comprendre leur rôle sur le climat et mettre en relation la nature des roches formées avec les paléoclimats du Crétacé.
- Exploiter les équations chimiques associées aux transformations d'origines géologiques pour modéliser les modifications de la concentration en CO_2 atmosphérique.
- Mobiliser les acquis antérieurs sur le cycle du carbone biosphérique et les enrichir des connaissances sur les réservoirs géologiques (carbonates, matière organique fossile) et leurs interactions ».

Attention

Comme la circulation océanique n'est pas représentée, SimClimat ne permet pas d'aborder le point de "savoirs" suivant :

« De plus, la variation de la position des continents a modifié la circulation océanique ».

1. Constat

La figure 1 montre l'évolution du $\delta_{18}O$ des carbonates océaniques depuis 500 millions d'années. Le $\delta_{18}O$ des carbonates permet de reconstituer la masse des calottes glaciaires : comme la glace des calottes a un $\delta_{18}O$ appauvri, plus de l'eau est stockée dans les calottes, plus l'eau résiduelle dans les océans est enrichie, et donc plus les carbonates formés sont enrichis. On observe une alternance de phases chaudes (sans calottes) et de glaciations (avec calottes). La température globale de la Terre a donc fortement varié au cours du phanérozoïque.

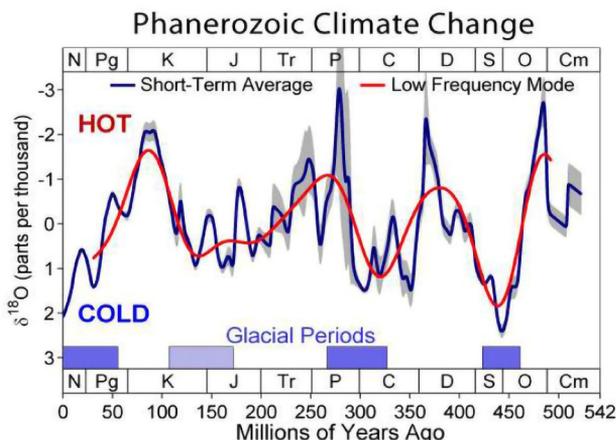


Figure 1 : Evolution du $\delta_{18}O$ des carbonates océaniques au cours depuis 500 millions d'années. Figure prise sur Wikipedia (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic_Climate_Change.png) et adaptée d'après Veizer et al. (1999). Attention à l'échelle inversée sur l'axe des ordonnées !

La figure 1 montre l'évolution du $\delta_{18}O$ des carbonates océaniques depuis 500 millions d'années. Le $\delta_{18}O$ des carbonates permet de reconstituer la masse des calottes glaciaires : comme la glace des calottes a un $\delta_{18}O$ appauvri, plus de l'eau est stockée

dans les calottes, plus l'eau résiduelle dans les océans est enrichie, et donc plus les carbonates formés sont enrichis. On observe une alternance de phases chaudes (sans calottes) et de glaciations (avec calottes). La température globale de la Terre a donc fortement varié au cours du phanérozoïque.

2. Problème posé

Comment expliquer les variations de la température globale de la planète aux échelles de temps géologiques ? Pour préciser la question, nous allons nous intéresser à trois périodes particulières : la glaciation permo-carbonifère, la période chaude du Crétacé, et le refroidissement tertiaire entraînant la glaciation quaternaire. La démarche scientifique se poursuit pour chacune de ces périodes.

A. Pourquoi la température était-elle plus froide au permo-carbonifère ?

3. Hypothèse

La plupart des gisements de charbon datent du carbonifère. Le charbon est formé à partir de restes d'êtres vivants qui ont au préalable assimilé le carbone du CO₂ de l'atmosphère. Ceci constitue donc un stockage biologique de carbone. Quand ce stockage existe, on peut imaginer que la concentration en CO₂ diminue. Ceci serait cohérent avec l'évolution de la concentration en CO₂ depuis 500 millions d'années reconstituée d'après différents modèles biogéochimiques (figure 2). Les reconstitutions sont assez différentes entre elles, ce qui reflète les incertitudes fortes associées à ces reconstitutions, mais à la fin du Carbonifère et au permien, toutes s'accordent sur des concentrations en CO₂ faibles.

On s'attend à ce qu'une faible concentration en CO₂ entraîne une diminution de la température par réduction de l'effet de serre.

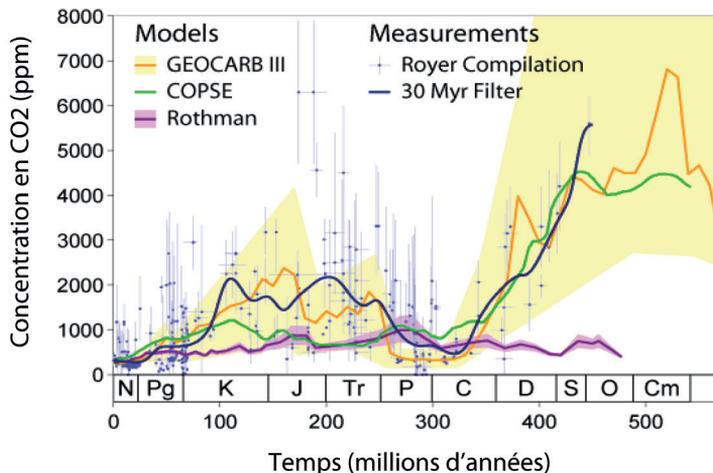


Figure 2 : Evolution de la concentration en CO₂ depuis 500 millions d'années reconstituée d'après différents modèles bio-géochimiques. Figure adaptée d'après une figure prise depuis Wikipedia (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phanerozoic_Carbon_Dioxide.png) et préparée par R. A. Rohde.

4. Expérience témoin

On lance une simulation préindustrielle d'un million d'années, sans changer aucun paramètre. La température reste constante (figure 3, rouge).

5. Expérience de test

On superpose une simulation dans laquelle on active le stockage biologique, avec un taux de séquestration du carbone de 0,0014 Gt/ppm/an cohérent avec les modèles biogéochimiques pour le Carbonifère (Berner 2003).

6. Résultats

On constate que la concentration en CO₂ diminue jusqu'à se stabiliser à une valeur plus faible (figure 3, vert). La température diminue elle aussi, d'environ 10°C. La calotte glaciaire s'étend jusqu'à des latitudes plus basses, indiquant une forte glaciation.

On remarque que malgré la persistance du stockage biologique, un nouvel équilibre s'établit : des rétroactions négatives finissent toujours par stabiliser le système climatique vers un état d'équilibre (Journe et Dufresne, 2018).

On remarque aussi que l'évolution vers le nouvel état d'équilibre est lente : le nouvel équilibre plus froid est atteint au bout de 50 000 ans environ. Ceci est cohérent avec le fait que ce facteur agisse à l'échelle de temps géologique. En classe, on peut laisser les élèves réfléchir au protocole expérimental, et en particulier à la durée de la simulation. Tant qu'on n'a pas encore atteint un nouvel équilibre, la simulation doit être rallongée.

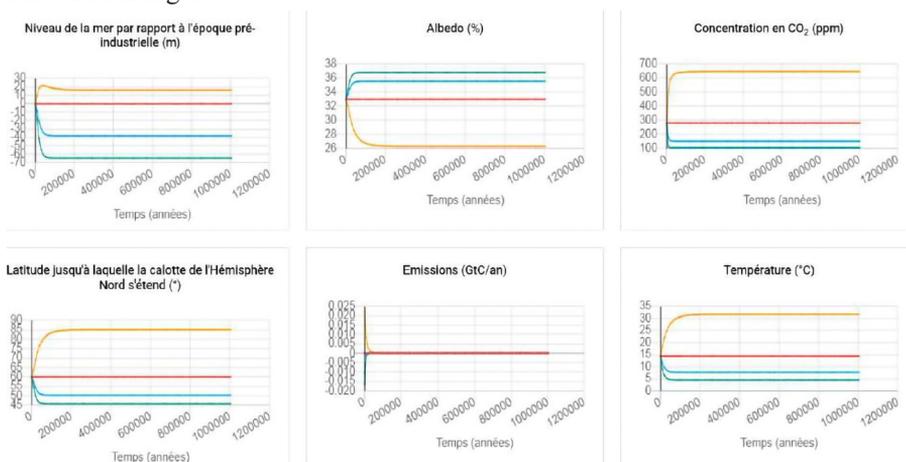


Figure 3 : Copie d'écran de la page d'affichage des résultats de SimClimat pour une simulation préindustrielle sans modifier les paramètres (rouge), une simulation avec un stockage biologique comme au Carbonifère (vert), des émissions de CO₂ par le volcanisme et l'activité des dorsales doublées par rapport à l'actuel (jaune) et avec une consommation de CO₂ par altération continentale doublée par rapport à l'actuel (bleu).

7. Conclusion

Le stockage biologique entraîne une diminution de la concentration en CO₂ qui entraîne une diminution de la température. C'est un mécanisme possible pour expliquer l'entrée en glaciation à la fin du Carbonifère.

B. Pourquoi la température était-elle plus chaude à la fin Crétacé ?

3. Hypothèse

La figure 2 montre un maximum local de concentration en CO₂ au Crétacé. Au Crétacé, l'activité des dorsales était maximale. Or l'activité des dorsales libère du CO₂. On propose donc comme hypothèse que la forte activité des dorsales a entraîné une augmentation du CO₂ et donc, par effet de serre, de la température.

4. Expérience témoin

La même que précédemment (figure 3, rouge).

5. Expérience de test

On superpose une simulation dans laquelle on double les émissions de CO₂ par volcanisme et activités des dorsales. Il est actuellement d'environ 0,08 Gt/an, on le met à 0,2 Gt/an

6. Résultats

On constate que la concentration en CO₂ augmente jusqu'à se stabiliser à une valeur plus forte, à environ 650 ppm. La température augmente elle aussi, d'environ 15°C (figure 3, jaune).

On remarque de nouveau que malgré la persistance des émissions de CO₂ plus fortes, un nouvel équilibre s'établit, au bout de 100 000 ans environ.

7. Conclusion

L'augmentation des émissions de CO₂ par volcanisme et activités des dorsales entraîne une augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ et donc de la température.

C. Pourquoi la température diminue-t-elle au tertiaire ?

3. Hypothèse

On constate que la diminution de température au tertiaire (figure 1) est concomitante de la diminution de la concentration en CO₂ (figure 2). Au Tertiaire, la paléogéographie mondiale est bouleversée par la fermeture de la Thétis entraînant la formation de la chaîne de collision alpine (Alpes, Himalaya). Dans les montagnes, les roches sont mises à l'affleurement et sont donc plus facilement érodables et altérables. Or l'altération des roches consomme du CO₂. On propose donc l'hypothèse que l'amplification de l'altération continentale entraîne une baisse de la concentration en CO₂ et donc de la température.

4. Expérience témoin

La même que précédemment (figure 3, rouge).

5. Expérience de test

On superpose une simulation dans laquelle on double le taux de consommation du CO₂ par altération continentale.



6. Résultats

On constate que la concentration en CO₂ diminue jusqu'à se stabiliser à une valeur plus faible. La température diminue elle aussi de presque 10°C (figure 3, bleu).

7. Conclusion

L'augmentation du puits de CO₂ par altération continentale entraîne une diminution de la concentration atmosphérique en CO₂ et donc de la température.

Ce même mécanisme peut aussi avoir contribué à la glaciation permo-carbonifère qui a suivi la surrection de la chaîne hercynienne.

Discussion

Nous avons donc identifié 3 facteurs contrôlant les variations de la température aux échelles de temps géologiques : stockage biologique, volcanisme et activité des dorsales, et altération continentale. Ces 3 facteurs agissent d'abord sur la concentration en CO₂, puis sur la température par le biais de l'effet de serre.

D'autres facteurs non liés au cycle du carbone existent, mais ne peuvent pas être testés ici, comme la position des continents et leur effet sur la circulation océanique. Ainsi, la mise en place de la circulation océanique méridienne dans l'Atlantique Nord, associée à la fermeture de la Thétis, l'ouverture de l'océan Atlantique et la fermeture de l'isthme de Panama, a pu contribuer au refroidissement tertiaire.

Références

- Berner, R. A. (2003). Overview the long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426 :323–326.
- Boucher, O., Dufresne, J.-L., Vial, J., Brun, E., Cattiaux, J., Chauvin, F., Salas y Mélia, D., Voltaire, A., Bopp, L., Braconnot, P., Ciais, P., Yiou, P., Guilyardi, E., Mignot, J., Guivarch, C. (2015). Projections des changements climatiques futures. *La Météorologie*, 55 :56–68.
- Dufresne, J.-L., Salas y Mélia, D., Denvil, S., Tyteca, S., Arzel, O., Bony, S., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Fairhead, L., Fichet, T., Foujols, M.-A., Friedlingstein, P., Guéremy, J.-F., Hourdin, F., Idelkadi, A., Levy, C., Madec, G., Marquet, P., Marti, O., Musat, I., Planton, S., Royer, J.-F., Swingedow, D., and Voltaire, A. (2006). Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 55 :45–59.
- Dufresne, J.-L. and Bony, S. (2008). An assessment of the primary sources of spread of global warming estimates from coupled atmosphere-ocean models. *J. Clim.* 2.1, 16
- Journe, V. et Dufresne, J.-L. (2018). Une expérience simple pour comprendre les rétroactions climatiques positives. *La Météorologie*, 101:13-20.
- Masson-Delmotte, V., Braconnot, P., Kageyama, M., and Sepulchre, P. (2015). Qu'apprend-on des grands changements climatiques passés ? *La Météorologie*, 88 :25-35.



- Masson-Delmotte, V. and Chapellaz, J. (2002). Au coeur de la glace, les secrets du climat. *La Météorologie*, 37 :18–25.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N. I., Barnola, J. M., Basile, I., Benders, M., Chappellaz, J., David, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V. M., Legrand, M., Lipenkov, V. Y., Lorius, C., Pépin, L., Ritz, C., Saltzman, E. Sievenard, M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), 429.
- Risi, C (2015). SimClimat, un logiciel pédagogique de simulation du climat. *La Météorologie*, 88:15-19.
- Risi, C. et Bony, S. (2019). Les nuages, enfants terribles du climat. *The Conversation*. <https://theconversation.com/les-nuages-enfants-terribles-du-climat-113102>
- Risi, C, Bosdeveix, R, Rajchenbach, M (2019). Le climat dans les nouveaux programmes de lycée. *La Météorologie*, 106:19-20.
- Spiga, A. (2016). Comment expliquer simplement la formation des nuages? *La Météorologie*, 95 : 21–24.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O. and Strauss, H. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology* 161, 59-88.