

SimClimat, un logiciel pédagogique de simulation du climat

Camille Risi

Laboratoire de météorologie dynamique, Institut Pierre-Simon Laplace, Université Pierre-et-Marie-Curie / CNRS, Paris

camille.risi@lmd.jussieu.fr

Le logiciel SimClimat permet de réaliser des simulations climatiques à différentes échelles de temps. Il repose sur un modèle de bilan radiatif de la Terre à l'échelle globale, suffisamment simple pour simuler des millions d'années en quelques secondes sur n'importe quel ordinateur personnel. SimClimat calcule la température de surface moyenne du globe, le niveau des mers, l'extension moyenne des calottes de glace polaire et la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre. Le logiciel permet à l'utilisateur de tester l'influence de divers paramètres sur le climat (figure 1), ainsi que de « brancher » ou « débrancher » certaines rétroactions climatiques. Les résultats s'affichent sous la forme de courbes et de dessins (figures 2, 3, 4 et 6).

Contenu physique

SimClimat inclut des paramétrisations simplifiées du transfert radiatif, des cycles de l'eau et du carbone, des calottes de glace et du niveau des mers. Les paramètres du modèle ont été ajustés de façon à refléter notre compréhension du système climatique. En conséquence, ce modèle permet non seulement d'expliquer les variations paléoclimatiques observées, mais aussi de reproduire les projections de changement climatique simulées par des modèles de climat beaucoup plus sophistiqués, comme ceux utilisés pour les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec).

Téléchargement et exploitation pédagogique

Le logiciel est téléchargeable sur les sites du Laboratoire de météorologie dynamique et de Météo-France. Sur les deux sites, les interfaces graphiques sont légèrement différentes, mais le modèle sous-jacent est identique. L'interface est disponible en anglais ou en français. Vous trouverez aussi sur les sites un manuel explicatif et de nombreux exemples d'utilisation pédagogique qui vont de l'école primaire au master de l'université. L'exploitation pédagogique est facilement adaptable au niveau du public. Par exemple, les élèves de primaire aiment faire varier les émissions humaines de CO₂. Le niveau de la mer est visualisé sous la forme d'un dessin et les enfants s'amusent à engloutir (ou à sauver) un bonhomme sur une île. Pour les étudiants de master, le logiciel permet d'aborder les notions de bilan radiatif, de rétroactions climatiques, de stabilité et d'hystérésis.

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'exploitation pédagogique qui servent d'introduction au logiciel.

Exemple 1 : Le bilan radiatif de la Terre et ses variations

Dans le premier exemple, nous partons d'un état initial correspondant à l'état pré-industriel, supposé à l'équilibre

But pédagogique : comprendre le fonctionnement du climat à différentes échelles de temps

Public : du CM1 à l'université : discours adaptable

Matériel nécessaire : un ordinateur

Sites internet :
www.lmd.jussieu.fr/~crlmd/simclimat

<http://education.meteofrance.fr/lycee/animations/logiciel-simclimat-un-modele-simple-de-bilan-radiatif-de-la-terre>

et non influencé par les activités humaines. Si on ne change aucun paramètre, la température reste constante : ceci constitue l'expérience témoin.

Qu'est-ce qui contrôle la température moyenne de cet état ? Pour répondre à cette question, nous pouvons faire varier différents facteurs et visualiser leurs effets sur le climat. La sensibilité du climat à ces facteurs est interprétée ici en considérant le bilan radiatif de la Terre. Ainsi, l'énergie du rayonnement solaire absorbé par la Terre doit être contrebalancée par l'énergie du rayonnement infrarouge émis par la Terre vers l'espace. Le rayonnement solaire est lui-même fonction de la puissance solaire, de la distance de la Terre au Soleil et de l'albédo planétaire (proportion de rayonnement solaire réfléchi par la Terre). Le rayonnement infrarouge émis par la Terre est, quant à lui, fonction de la température de surface de la Terre et de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre, dont la vapeur d'eau (H_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2).

Les tests de sensibilité à la distance Terre-Soleil permettent d'aborder les climats qui règnent sur les différentes planètes de notre système solaire. Avec le test de la puissance solaire, nous pouvons comparer la Terre actuelle à la Terre primitive d'il y a plusieurs milliards d'années, lorsque le Soleil émettait 30 % moins de rayonnement (Charnay *et al.*, 2013). Les tests de sensibilité aux concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre montrent l'importance de l'effet de serre dans l'établissement d'une Terre habitable. Ils mettent aussi en évidence l'importance relative de la vapeur d'eau et du CO_2 dans l'effet de serre naturel total.

Nous conseillons de réaliser des simulations pour des périodes suffisamment longues (d'au moins 100 000 ans) pour laisser à toutes les composantes du système climatique le temps d'atteindre leurs équilibres respectifs.

Exemple 2 : Variations orbitales et climat

Le deuxième exemple nous permet d'illustrer comment les variations des paramètres orbitaux influencent le climat. Nous partons de l'état initial pré-industriel et réalisons des simulations d'au moins 100 000 ans pour laisser au système le temps de s'équilibrer. En

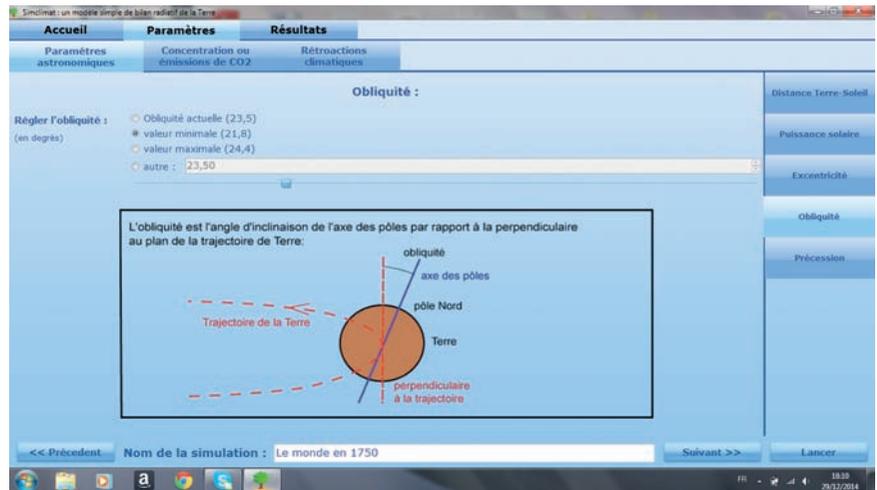


Figure 1. Copie d'écran de l'interface graphique du logiciel SimClimat. Sur cette page, on peut choisir la valeur minimale de l'obliquité qui sert à produire la courbe verte de la figure 2.

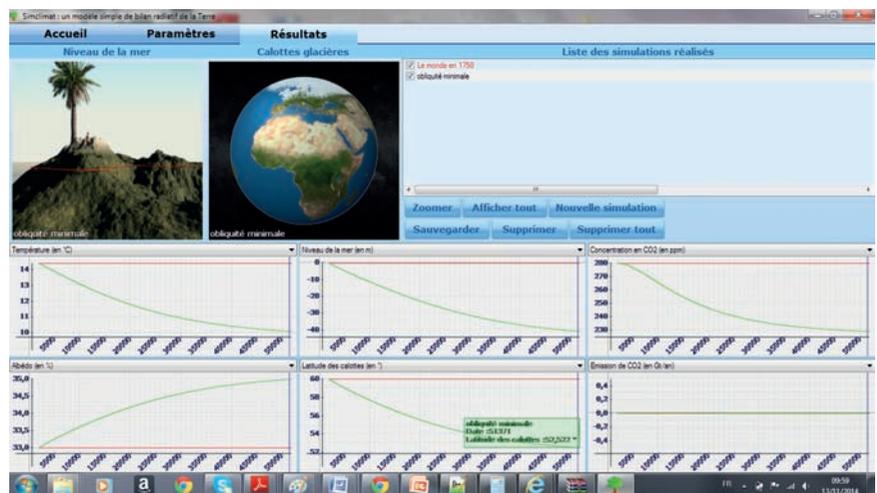


Figure 2. Copie d'écran de l'interface graphique montrant des expériences sur l'influence des variations orbitales sur le climat. La courbe rouge représente l'expérience témoin, sans modification de paramètres, correspondant à un état pré-industriel. En vert, l'obliquité a été réduite à sa valeur minimale. Cela provoque une réduction de l'ensoleillement aux hautes latitudes en été et donc un refroidissement de la Terre, avec une extension des calottes similaire à celle reconstituée lors des périodes glaciaires. Notons aussi plusieurs conséquences du changement de température. D'abord, la concentration en CO_2 est réduite, car un océan plus froid stocke plus de CO_2 . Ensuite, le niveau de la mer baisse, car davantage d'eau est stockée dans les calottes de glace et l'eau restant dans l'océan se rétracte avec le froid.

diminuant l'obliquité de l'axe de la Terre (figure 1), on constate que la température diminue (figure 2). Si on « débranche » la rétroaction de l'albédo de la glace, la température reste en revanche constante. On en déduit que cette rétroaction joue un rôle crucial dans la réponse du climat à un changement de l'obliquité. En effet, si l'obliquité de l'axe terrestre est réduite, alors les hautes latitudes de l'hémisphère Nord reçoivent moins d'énergie solaire en été (figure 3a). Or, cela limite la fonte des calottes polaires qui peuvent alors s'étendre. L'albédo planétaire augmente, ce qui fait diminuer la température et

renforce encore les calottes polaires (figure 3b).

Le même mécanisme explique la réponse du climat aux autres paramètres orbitaux : excentricité et précession. L'obliquité, l'excentricité et la précession varient respectivement à des échelles de temps d'environ 40 000, 100 000 et 20 000 ans. Combinées, les variations de ces paramètres rythment les variations glaciaires-interglaciaires que l'on retrouve dans diverses archives paléoclimatiques (Masson-Delmotte et Chappellaz, 2002 ; Masson-Delmotte *et al.*, 2015, ce numéro).

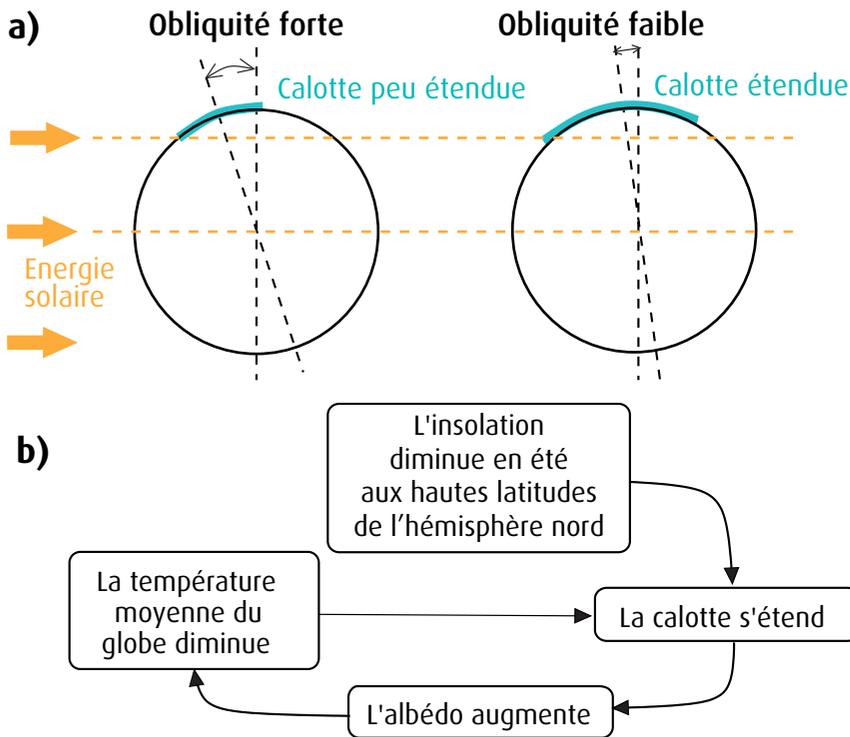


Figure 3. Interprétation de l'expérience sur l'obliquité réalisée en figure 2. a) Schéma expliquant l'effet de l'obliquité sur l'insolation en été des hautes latitudes de l'hémisphère Nord et donc sur l'extension des calottes. b) Schéma expliquant la rétroaction de l'albédo de la glace lorsque l'obliquité de l'axe de la Terre diminue : plus la calotte s'étend, plus l'albédo de la planète augmente et donc plus elle se refroidit.

Exemple 3 : La Terre boule de neige

Dans le troisième exemple, nous partons à nouveau de l'état initial pré-industriel et réalisons des simulations d'au moins 100 000 ans. Quand nous faisons diminuer la concentration atmosphérique en CO₂, nous voyons que la Terre s'englace en totalité en dessous d'un certain seuil (figure 4). Cet état résulte de la rétroaction positive de l'albédo de la glace (figure 3b). Plus

la Terre est froide, plus elle s'englace, donc plus elle réfléchit la lumière solaire et plus elle se refroidit. Les archives paléoclimatiques suggèrent qu'une telle Terre « boule de neige » aurait pu se produire au Protérozoïque, entre 0,5 et 2,5 milliards d'années (Ramstein *et al.*, 2004).

Partons maintenant de cet état totalement englacé (en ayant préalablement sauvegardé la simulation) et essayons de revenir à l'état initial (pré-industriel)

de la Terre, en ré-augmentant la concentration atmosphérique de CO₂. Nous nous rendons compte alors que l'état « boule de neige » est très stable. En effet, une fois la Terre englacée, l'albédo est tellement élevé que la Terre n'absorbe qu'une très faible quantité du rayonnement solaire. Pour retourner à l'état initial, il faut augmenter le CO₂ jusqu'à ce que l'atmosphère en contienne 30 % (figure 5). Après l'étape « Terre boule de neige », la surface de la planète est alors très chaude. Les archives paléoclimatiques sont cohérentes avec ces expériences : les sédiments carbonatés suivant les épisodes présumés de Terre boule de neige suggèrent des climats très chauds et une atmosphère très riche en CO₂. De telles concentrations en CO₂ peuvent être atteintes par l'accumulation du CO₂ produit par le volcanisme sur plusieurs millions d'années. En effet, lorsque les continents sont recouverts de glace, les roches ne sont plus en contact avec l'atmosphère, ce qui limite fortement les réactions chimiques à leur surface qui consomment habituellement du CO₂. Ainsi, le CO₂ peut s'accumuler plus facilement dans l'atmosphère lors d'un épisode de boule de neige. Ce mécanisme peut être vérifié avec le logiciel en jouant sur les paramètres du cycle du carbone. Il faut néanmoins garder en mémoire que le logiciel ne représente pas tous les mécanismes associés à une sortie de boule de neige. Ceci pourrait expliquer que le réchauffement simulé en sortie de boule de neige est exagéré (figure 5).

Ces expériences d'entrée et de sortie de l'état « boule de neige » mettent en évidence l'existence de plusieurs états stables dans le climat terrestre (figure 6a) et montrent que les changements climatiques entre ces états ne sont pas facilement réversibles (figure 6b) : c'est le phénomène d'hystérésis.

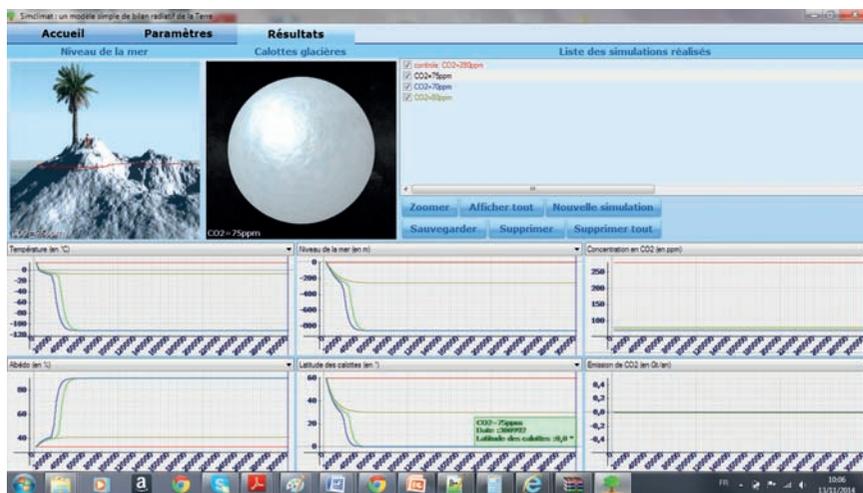


Figure 4. Copie d'écran de l'interface graphique montrant des expériences sur l'entrée de la Terre dans l'état « boule de neige ». En rouge, la concentration en CO₂ est maintenue à sa valeur pré-industrielle de 280 ppm. En kaki, en noir et en bleu, les concentrations sont instantanément réduites à respectivement 80, 75 et 70 ppm. On voit que lorsque la concentration en CO₂ passe sous un certain seuil (ici entre 75 et 80 ppm), la Terre s'englace totalement.

Exemple 4 : Le réchauffement climatique en cours et les différentes rétroactions

Dans le dernier exemple, nous partons d'un état plus récent, déjà affecté par les émissions humaines. Dans cet état, nous pouvons jouer sur les émissions humaines de CO₂ pour répondre aux questions suivantes. De combien la Terre se réchauffera-t-elle si on continue d'émettre autant de CO₂ qu'aujourd'hui ? Stabilisera-t-on la température si on arrête les émissions dès maintenant ? Quelles quantités d'émissions humaines

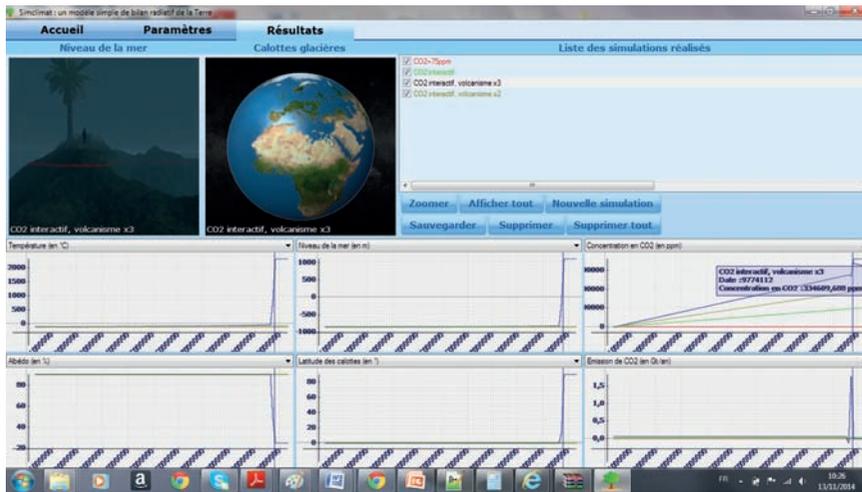


Figure 5. Copie d'écran de l'interface graphique montrant des expériences sur la sortie de la Terre d'un état « boule de neige ». En rouge, la concentration est maintenue à 75 ppm. En vert, marron et bleu, la concentration en CO_2 est calculée de manière interactive par le modèle du cycle du carbone ; les émissions de CO_2 par le volcanisme sont respectivement égales, deux fois et trois fois supérieures aux valeurs actuelles. On voit que lorsque le CO_2 émis par le volcanisme s'accumule dans l'atmosphère et que le volcanisme est trois fois plus intense qu'à notre époque, la Terre ne sort brusquement de son état « boule de neige » qu'après quelques millions d'années, après avoir atteint des températures très élevées.

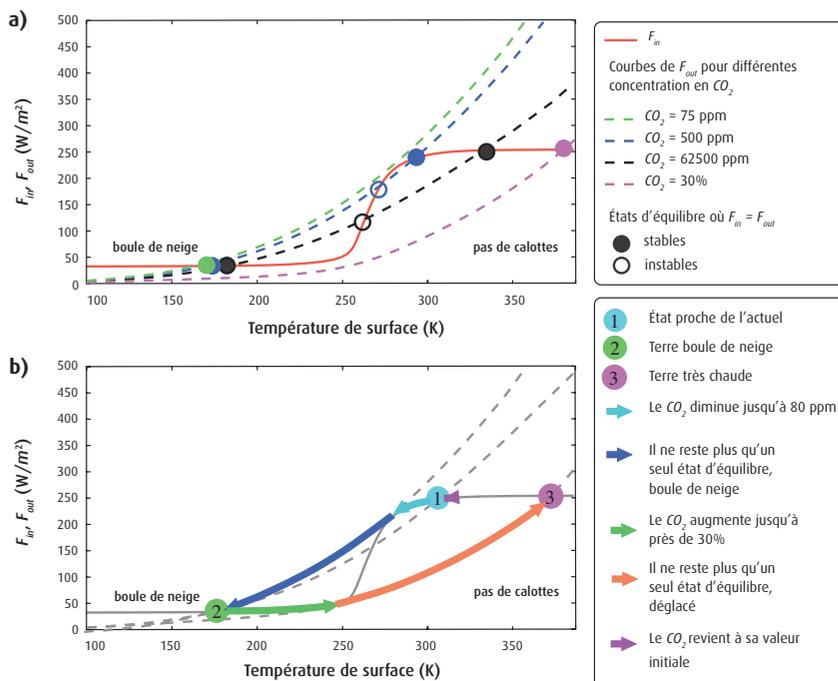


Figure 6. Interprétation des expériences réalisées en figures 4 et 5. a) Évolution de l'énergie solaire absorbée par la Terre (F_{in}) et de l'énergie émise par la Terre vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge (F_{out}) en fonction de la température moyenne de surface de la Terre. Différentes fonctions F_{out} sont tracées, selon la concentration atmosphérique en CO_2 . Le climat est à l'équilibre lorsque $F_{in} = F_{out}$, c'est-à-dire lorsque les deux courbes se croisent (ronds). Pour des concentrations en CO_2 proches des concentrations actuelles (bleu) ou jusqu'à plusieurs pourcents (noir), il y a trois états d'équilibre (ronds), dont deux sont stables (ronds pleins) : l'un avec une Terre boule de neige et l'autre avec une Terre peu englacée. Pour des concentrations en CO_2 beaucoup plus faibles (par exemple pour une concentration en CO_2 de 75 ppm, vert), seul l'état d'équilibre « boule de neige » existe. Pour des concentrations en CO_2 fortes (par exemple de 30 %, rose), seul l'état d'équilibre peu englacé existe. b) Une figure similaire permet d'illustrer le phénomène d'hystérésis. Nous partons de l'état 1 proche de l'actuel. Si la concentration en CO_2 diminue, la température diminue afin de maintenir $F_{in} = F_{out}$ (flèche cyan). Si la concentration en CO_2 diminue davantage, le seul équilibre possible correspond à une Terre englacée (état 2) vers lequel la Terre bascule (flèche bleue). Si le CO_2 augmente à nouveau, la température augmente afin de maintenir $F_{in} = F_{out}$, mais suivant une trajectoire (flèche verte) différente de celle suivie lors du refroidissement. Lorsque le CO_2 augmente davantage pour atteindre une concentration de l'ordre de 30 %, le seul équilibre possible correspond à une Terre déglacée (état 3). La Terre bascule alors vers cet équilibre (flèche rouge) correspondant à des températures très chaudes. Ce n'est qu'à partir de cet état que la Terre peut revenir à son état initial au fur et à mesure que la concentration en CO_2 diminue (flèche mauve).

permettent de limiter à seulement 2°C l'augmentation de température d'ici à 2100 ? Dans ces exercices, on apprend que le cycle du carbone et le climat ont une certaine inertie et que le niveau de la mer continue d'augmenter après l'arrêt des émissions.

SimClimat permet ainsi d'explorer plus en détail la réponse du climat aux émissions de CO_2 . Pour cela, nous « débranchons » plusieurs rétroactions (figure 7) et, en premier lieu, celle de la vapeur d'eau. Ceci met en évidence que plus du tiers de l'augmentation de la température est lié à cette rétroaction. Quand la température augmente, l'humidité contenue dans l'atmosphère augmente également (d'après la relation de Clausius-Clapeyron). L'amplification de l'effet de serre dû à la vapeur d'eau accroît à son tour la température. Cette rétroaction est donc positive : un changement initial est renforcé par le phénomène. En second lieu, si l'on débranche la rétroaction de l'albédo de surface, nous constatons que cette rétroaction est également positive, mais qu'elle reste assez faible aux échelles de temps courtes. Enfin, en débranchant le rôle de l'océan ou de la végétation dans le cycle du carbone, nous voyons que l'augmentation de la température est plus forte. La concentration atmosphérique en CO_2 augmente plus vite, ce qui montre que l'océan et la végétation épongent en partie (environ pour moitié) les émissions humaines de CO_2 .

Conclusion

SimClimat a été utilisé avec succès dans des situations diverses. Nous l'avons utilisé lors de manifestations scientifiques, comme le Forum international de la météo et du climat, ou dans un cadre associatif. Le logiciel sert également de support de cours en lycée ou en master, ou pour des travaux personnels encadrés en classe de première. Sa facilité d'utilisation permet également de travailler avec des élèves en primaire, qui en apprécient le côté ludique.

Il faut toutefois bien garder en tête les limites de ce logiciel, dont le modèle sous-jacent est extrêmement simple. Seules les moyennes globales sont calculées et aucune information régionale n'est disponible. Les processus physiques sont représentés de manière incomplète, sans aucune comparaison avec les modèles de climat utilisés

pour le Giec (Dufresne *et al.*, 2006 ; Boucher *et al.*, 2015, ce numéro). Ceci peut engendrer des résultats différents des attentes. Dans des conditions

extrêmes, il est possible que les températures « explosent » et atteignent des valeurs anormalement chaudes ou froides. Il convient donc de garder un

esprit critique. Ce logiciel est complémentaire de celui présenté dans le numéro précédent de *La Météorologie* (Boucher, 2014).

Remerciements

Ce logiciel a été conçu initialement en collaboration avec Nicolas Gama, Michael Jentzer, Gaëlle Diribarne et Olivier Jaulent. Franck Guyon a apporté une aide technique. Le contenu physique du modèle a bénéficié de discussions avec Jean-Louis Dufresne. Marion Saint-Lu a contribué à la réflexion sur l'exploitation pédagogique. Germaine Rochas a contribué à la promotion du logiciel au sein de Météo-France. Hakim Mamor a développé l'interface graphique de la version de Météo-France. Je remercie plusieurs enseignants pour m'avoir invitée dans leurs classes pour tester le logiciel, notamment Michael Jentzer, Anne-Sophie Frère et Marie-Cécile Darmon. Ce logiciel a aussi bénéficié de nombreux retours de la part d'autres enseignants. Cet article a été amélioré grâce aux suggestions d'un lecteur anonyme.

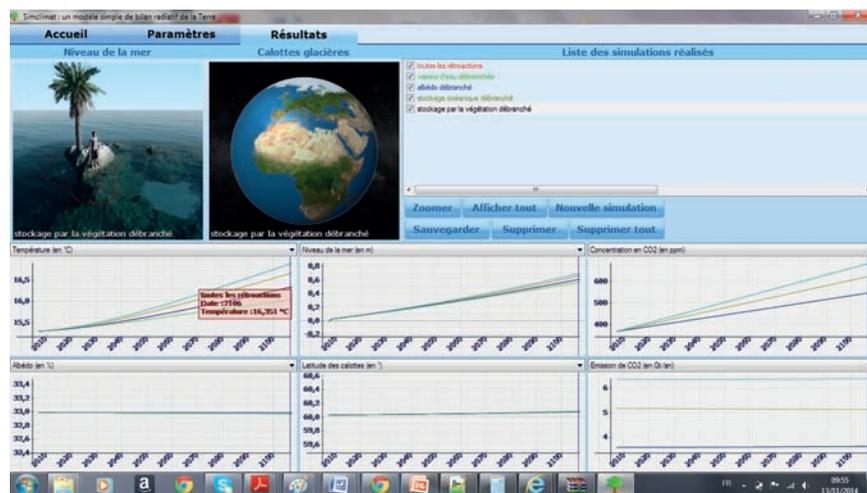


Figure 7. Copie d'écran montrant une série d'expériences testant l'effet des différentes rétroactions climatiques. En rouge (presque invisible sous la courbe bleue), les émissions anthropiques sont maintenues à leur valeur de 2007 pendant les 100 prochaines années. Différents mécanismes peuvent être « débranchés » : la rétroaction de la vapeur d'eau (en vert), de l'albédo des glaces (en bleu), le stockage du CO₂ par l'océan (en kaki) et le stockage du CO₂ par la végétation (en noir).

Bibliographie

- Boucher, O., 2014. Travaux dirigés sur l'utilisation d'un modèle de climat simplifié. *La Météorologie*, 87, 13-16.
- Boucher O., Dufresne J.-L., Vial J., Brun E., Cattiaux J., Chauvin F., Salas y Mélia D., Voldoire A., Bopp L., Braconnot P., Ciais P., Yiou P., Guilyardi E., Mignot J., Guivarch C., 2015. Projection des changements climatiques futurs. *La Météorologie*, 88, 56-68.
- Charnay B., Forget F., Wordsworth R., Leconte J., Millour E., Codron F., Spiga A., 2013. Exploring the faint young Sun problem and the possible climates of the Archean Earth with a 3-D GCM. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 10414-10431. doi: 10.1002/jgrd.50808
- Dufresne J.-L., *et al.*, 2006. Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPSL. *La Météorologie*, 55, 45-59. doi: 10.4267/2042/20120
- Masson-Delmotte V., Chappellaz, J., 2002. Au cœur de la glace, les secrets du climat. *La Météorologie*, 37, 18-25.
- Masson-Delmotte V., Braconnot P., Kageyama M., Sepulchre P., 2015. Qu'apprend-on des grands changements climatiques passés ? *La Météorologie*, 88, 25-35.
- Ramstein G., Donnadieu Y., Goddérès Y., 2004. Les glaciations du Protérozoïque. *C. R. Geosci.*, 336, 639-646. doi: 10.1016/j.crte.2003.12.018