

## VOIE GÉNÉRALE

2<sup>DE</sup>

1<sup>RE</sup>

T<sup>LE</sup>

*Sciences de la vie et de la Terre*

ENSEIGNEMENT

SPECIALITÉ

## SIMCLIMAT POUR COMPRENDRE LES VARIATIONS CLIMATIQUES PASSÉES

### Thème

Thème 2 - Enjeux planétaires contemporains.

### Note d'intention

L'analyse du système climatique à l'aide de modèles numériques est traitée dans le programme d'enseignement scientifique en classe terminale, dans la partie « 1.3 Le climat du futur » (plus particulièrement le savoir-faire « Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique, en exploitant un logiciel de simulation de celle-ci »). Cette ressource présente une utilisation possible de Simclimat pour traiter les variations climatiques à différentes échelles des temps géologiques par une démarche scientifique. Le principe est détaillé pour le Quaternaire et peut être transposé pour l'étude d'autres périodes, étant bien entendu que des démarches différentes peuvent être mises en œuvre pour aborder chacun de ces temps géologiques.

### Mots-clés

Variation climatique, modèle climatique, effet de serre, gaz à effet de serre, cycle du carbone, cycles de Milankovitch, obliquité, précession, excentricité, albédo, tectonique des plaques, volcanisme.

### Références au programme

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain.  
• Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées.

### Connaissances

Les mécanismes expliquant les variations climatiques passées (voir le détail pour chaque activité proposée).

### Compétences

Selon la démarche pédagogique, le logiciel de modélisation Simclimat permet de développer différentes compétences liées à la pratique de démarches scientifiques. Par nature, l'exploitation de ce logiciel permet de développer des compétences numériques et la compréhension du lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.

Retrouvez éducol sur



### Lien avec d'autres ressources

#### **Simclimat, un modèle numérique de climat**

La ressource « Simclimat, un modèle numérique de climat » décrit les modèles climatiques utilisés par les scientifiques et les compare au logiciel Simclimat.

#### **Simclimat et la démarche scientifique**

La ressource « Simclimat pour conduire une démarche scientifique » présente la démarche scientifique mise en œuvre par les chercheurs à l'aide des modèles numériques de climat et montre que ce même type de démarche peut être mise en œuvre avec le logiciel Simclimat.

## *Simclimat et les variations climatiques du Quaternaire*

### Connaissances

À l'échelle du Quaternaire, des données [...] font apparaître une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires durant les derniers 800 000 ans. 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 CO<sub>2</sub>); elles sont à l'origine des entrées et des sorties de glaciation.

### Capacités, attitudes

Mettre les variations temporelles des paramètres orbitaux, définis par Milankovitch, en relation avec les variations cycliques des températures au Quaternaire.

Simclimat peut être utilisé pour montrer l'effet des modifications des paramètres orbitaux sur le climat ainsi que l'importance des boucles de rétroactions.

Un exemple de travail, détaillant l'influence de l'obliquité, est présenté ci-dessous.

### Situation de départ

Les alternances cycliques des périodes glaciaires et interglaciaires depuis 800 000 ans sont mises en évidence par des indices géologiques de différentes natures : des traces liées aux périodes glaciaires (moraines, blocs erratiques, roches striées, modelés glaciaires...), des mesures de rapports isotopiques de l'oxygène dans l'eau des carottes de glaces réalisées en Antarctique ou au Groenland et/ou des mesures dans les tests carbonatés des sédiments...

Des corrélations avec des variations cycliques des paramètres orbitaux, notamment de l'obliquité, peuvent aussi être établies. On observe notamment une corrélation entre les périodes glaciaires et les périodes de faibles valeurs de l'obliquité.

## Problème

Comment expliquer cette succession cyclique de périodes glaciaires et interglaciaires ?

**Remarque :** si l'on souhaite construire une hypothèse avec les élèves, ce qui n'est pas une étape à conduire systématiquement, alors il faut structurer sa construction. Ici, on peut s'appuyer sur des apports scientifiques (graphiques des variations à long terme de l'excentricité, de la précession, de l'obliquité...). Certains élèves peuvent connaître, sinon l'existence de paramètres orbitaux, l'existence de variations cycliques de l'activité solaire; celles-ci permettent de décentrer la recherche de paramètres endogènes liés à l'activité interne et externe de la Terre et d'introduire l'idée de paramètres exogènes, astronomiques (ce « forçage astronomique » a été une hypothèse proposée dès 1842 par le mathématicien français Joseph-Alphonse Adhémar, abandonnée puis repropagée dans les années 1940 par le géophysicien serbe Milutin Milankovitch qui l'intègre à un modèle climatique plus complet. Il est finalement validé dans les années 1970 lorsque le modèle et les techniques d'étude des marqueurs lithologiques sont devenus plus performants). Simclimat permet d'éprouver tour à tour l'influence de chacun des paramètres orbitaux de Milankovitch sur le climat. Il permet aussi d'éprouver l'influence de la distance Terre-Soleil et la puissance solaire totale (mais pas directement les variations cycliques de l'activité solaire, qui pourraient être proposées par les élèves, et pour lesquelles les études récentes convergent vers une contribution décelable mais faible aux variations de la température de surface, des échelles régionales à globale).

On cherche à montrer qu'une diminution de l'obliquité est à l'origine d'un refroidissement qui peut provoquer l'entrée en période glaciaire.

L'entrée en période glaciaire peut être corrélée à une diminution de la température et à l'extension des calottes polaires.

## Protocole n°1

On réalise deux simulations dans lesquelles on fixe les mêmes conditions initiales (système climatique préindustriel) et la même durée de la simulation (par exemple 1 000 ans).

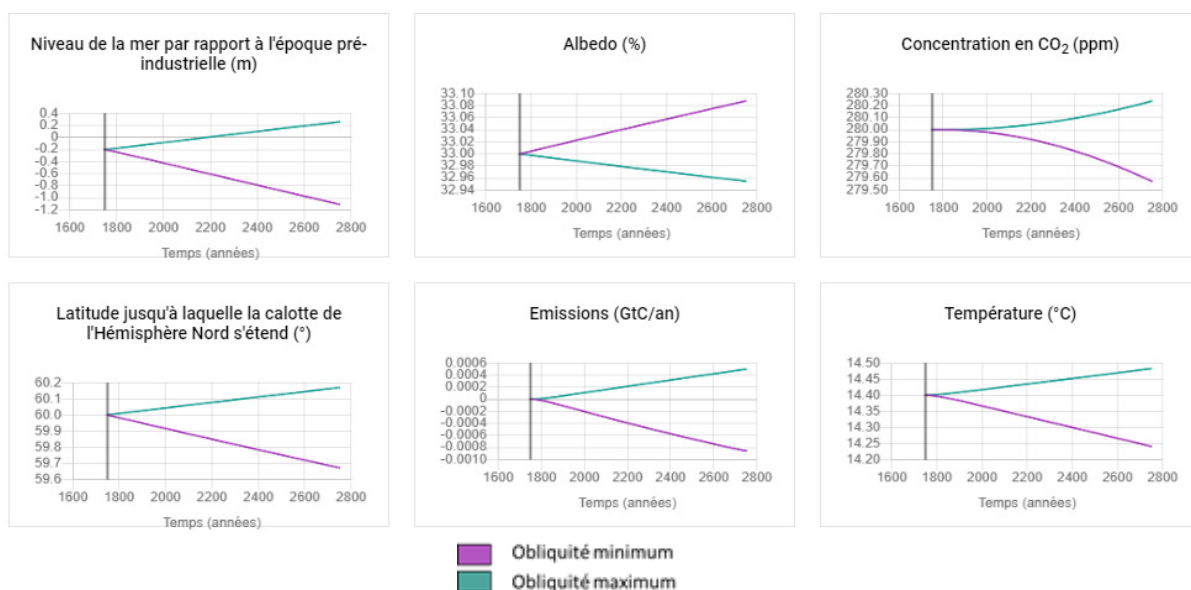
**Pour la simulation « obliquité minimum » :** on fixe l'obliquité au minimum et on ne modifie aucun autre paramètre dans le logiciel.

**Pour la simulation « obliquité maximum » :** on fixe l'obliquité au maximum et on ne modifie aucun autre paramètre dans le logiciel.

## Résultats attendus

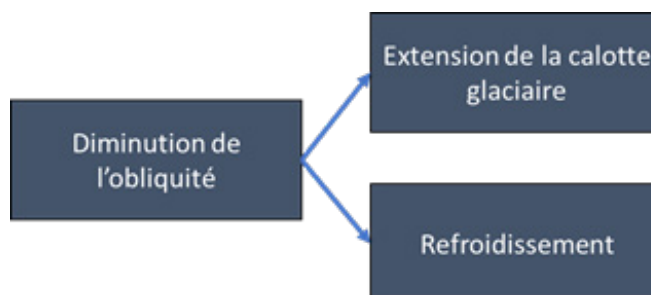
Si la diminution de l'obliquité est à l'origine d'un refroidissement et de l'entrée en période glaciaire, la simulation « obliquité minimum » montrera une diminution de la température et une diminution de la latitude des calottes plus importante que la simulation « obliquité maximum ».

## Résultats observés



## Interprétation

Les résultats observés correspondent aux résultats attendus, l'hypothèse est acceptable : la diminution de l'obliquité est à l'origine d'un refroidissement et de l'entrée en période glaciaire.



Après avoir mis en évidence l'influence de l'obliquité sur le climat, on poursuit l'investigation en s'interrogeant sur la nature du lien entre la diminution de l'obliquité d'une part et l'origine du refroidissement et de l'entrée dans une période glaciaire d'autre part.

Dans la simulation précédente, on constate que lors d'une diminution de l'obliquité, la calotte s'étend et l'albédo augmente. L'énergie renvoyée par la Terre vers l'espace augmente, la Terre perd de l'énergie. Ce qui peut conduire à l'hypothèse suivante : la rétroaction de l'albédo permet l'entrée en période glaciaire lors d'une diminution de l'obliquité.

**Remarque :** bien sûr ici on propose une hypothèse idéale, il est possible que les élèves n'aient pas intégré la dimension de la rétroaction dans l'hypothèse. Cette notion sera alors apportée au moment où on explicitera les mécanismes en jeu.

## Protocole n°2

On réalise deux simulations dans lesquelles on fixe les mêmes conditions initiales (système climatique préindustriel) et la même durée de simulation (par exemple 1 000 ans).

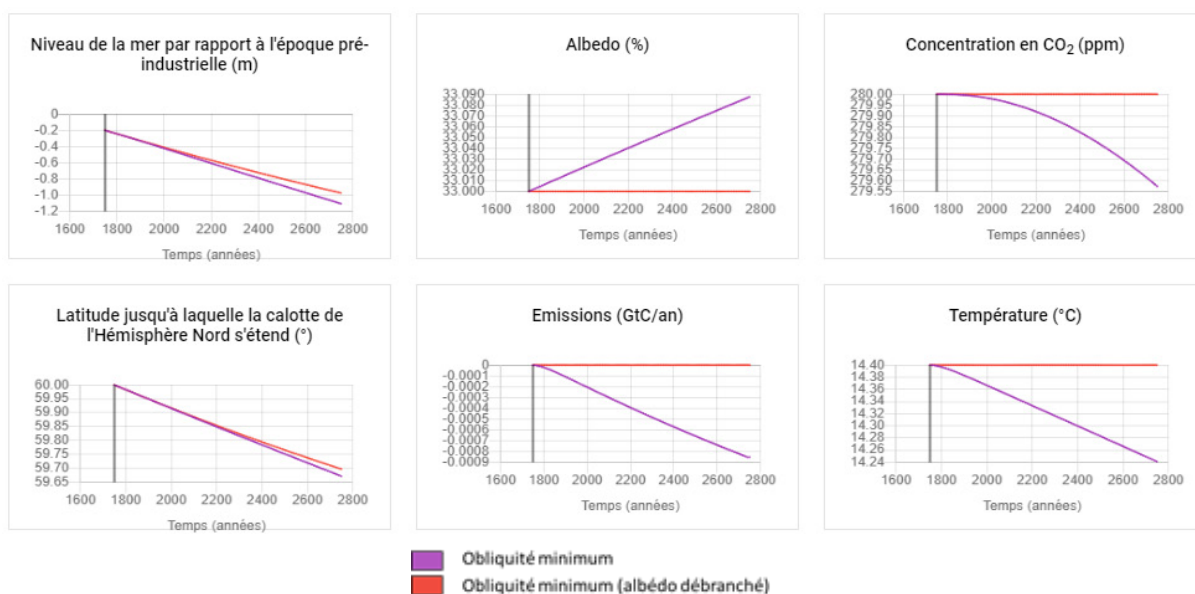
**Pour la simulation « obliquité minimum » (simulation contrôle) :** on fixe l'obliquité au minimum et on ne modifie aucun autre paramètre dans le logiciel.

**Pour la simulation « obliquité minimum albédo débranché » (simulation test) :** on fixe l'obliquité au minimum et on débranche la rétroaction de l'albédo (albédo constant).

## Résultats attendus

Si l'hypothèse est vraie et que la rétroaction de l'albédo permet l'entrée en période glaciaire, alors on devrait constater une diminution de la température globale lorsque la rétroaction de l'albédo est « branchée » (simulation contrôle) et une température globale stable, lorsque la rétroaction de l'albédo est « débranchée » (simulation test).

## Résultats



## Interprétation

Lorsque l'albédo est maintenu constant et donc que la rétroaction climatique de l'albédo est « débranchée », la température reste constante, alors qu'elle diminue fortement lorsque la rétroaction de l'albédo est présente. En revanche, on observe que, lorsque l'obliquité est minimale, l'absence de la rétroaction de l'albédo conduit malgré tout à une diminution de la latitude de la calotte de l'hémisphère nord (un peu moins importante que lorsque la rétroaction de l'albédo est branchée).

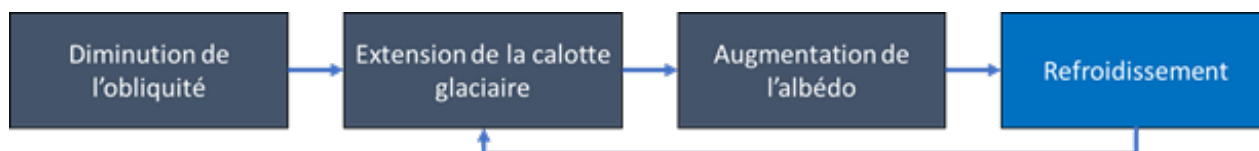
On peut ici conclure que l'hypothèse est acceptable, les mécanismes mis en évidence rendent bien compte des effets qui étaient prévus.

Retrouvez eduscol sur



On peut ainsi déduire que :

- la diminution de l'obliquité conduit à une diminution de la latitude de la calotte de l'hémisphère nord;
- c'est essentiellement la rétroaction de l'albédo qui conduit au refroidissement global du climat lors d'une diminution de l'obliquité.



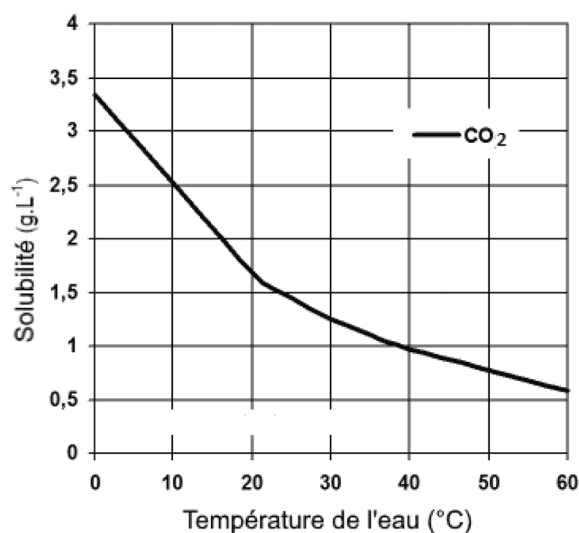
### Complément scientifique

La diminution de l'obliquité correspond à une diminution de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Cette diminution conduit à une réduction du contraste entre l'été et l'hiver. Les étés sont plus frais, les neiges et les glaces de l'hiver fondent plus difficilement et ne disparaissent pas totalement. Ce qui conduit à une extension des calottes et permet l'entrée en période glaciaire par la rétroaction de l'albédo.

On a vu que le changement de l'albédo était la principale cause de l'entrée en période glaciaire lors d'une diminution de l'obliquité.

Dans les simulations précédentes, on constate que lorsque l'obliquité est minimale, la concentration du CO<sub>2</sub> atmosphérique diminue. Cette observation peut amener à s'interroger sur le lien entre la diminution de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et la diminution de l'obliquité.

Les gaz peuvent être échangés entre l'océan et l'atmosphère. On parle de **dissolution** lorsque les gaz passent de l'atmosphère et l'océan et de **dégazage** lorsque les gaz dissous dans l'eau passent dans l'atmosphère. L'équilibre entre dissolution et dégazage dépend de la température (cette notion peut être amenée avec le graphique ci-dessous). Lorsque la température augmente, le dégazage augmente. C'est l'inverse lorsque la température diminue. Ceci amène à formuler l'hypothèse suivante.



Retrouvez éducol sur



Solubilité du CO<sub>2</sub> en fonction de la température

## Hypothèse

Lors d'une diminution de l'obliquité, le refroidissement amplifie la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'océan et donc diminue l'effet de serre et amplifie le refroidissement.

## Protocole n°3

On peut alors réaliser le protocole suivant : on réalise deux simulations dans lesquelles on fixe les mêmes conditions initiales (système climatique préindustriel) et la même durée de simulation (par exemple 1 000 ans).

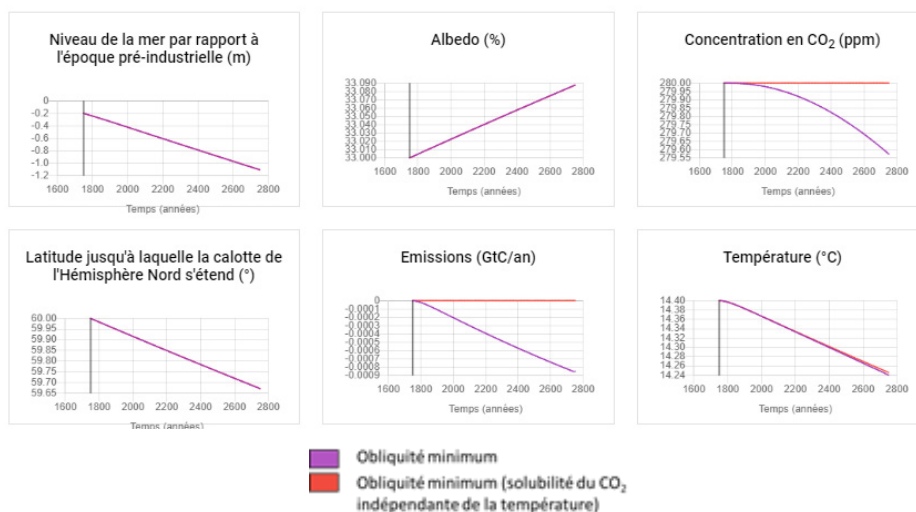
**Pour la simulation « obliquité minimum » (simulation contrôle) :** on fixe l'obliquité au minimum et on ne modifie aucun autre paramètre dans le logiciel.

**Pour la simulation « obliquité minimum et solubilité indépendante de la température » (simulation test) :** on fixe l'obliquité au minimum, on débranche la rétroaction de la solubilité océanique du CO<sub>2</sub> (le puits océanique ne dépend pas de la température).

## Résultats attendus

Si l'hypothèse est vraie et que le refroidissement lié à la diminution de l'obliquité amplifie la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'océan et donc amplifie le refroidissement en diminuant l'effet de serre, alors on devrait constater une plus forte diminution de la température globale lorsque la solubilité du CO<sub>2</sub> est dépendante de la température (simulation contrôle) que lorsque la solubilité du CO<sub>2</sub> est indépendante de la température (simulation test).

## Résultats



## Interprétation

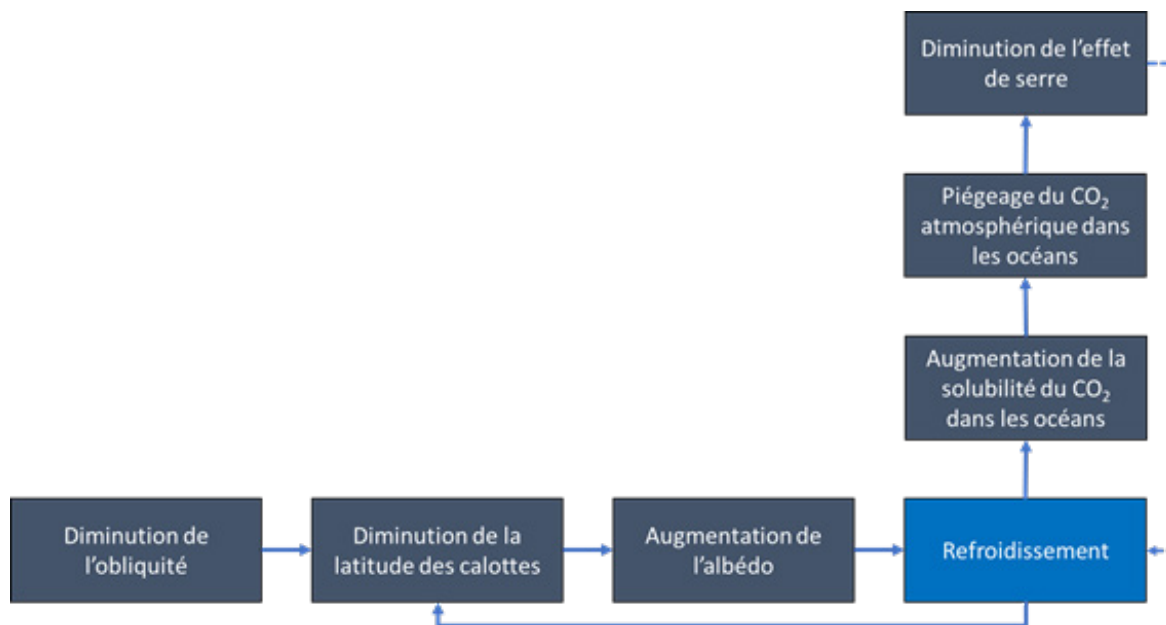
Dans le témoin comme dans le test, le modèle simule une entrée en période glaciaire. Mais quand la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'océan est indépendante de la température, le refroidissement est légèrement moins important. On observe que la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique reste constante, alors que dans le témoin, elle diminue. On déduit donc que la diminution de la solubilité du CO<sub>2</sub> avec la température induit une rétroaction positive qui amplifie le refroidissement, en réduisant la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> et donc l'effet de serre.

Retrouvez éducol sur



On peut ici conclure que l'hypothèse est acceptable, les mécanismes mis en évidence rendent bien compte des effets qui étaient prévus.

Lors d'une diminution de l'obliquité, la rétroaction de l'albédo est la principale cause du refroidissement global. Celui-ci est amplifié par la rétroaction liée à la solubilité océanique du CO<sub>2</sub>



**Remarques :** le même type de démonstration peut être effectué pour les autres paramètres orbitaux.

Les élèves ne réaliseront pas nécessairement l'ensemble des étapes proposées ici. La première étape peut être largement suffisante et peut être complétée par une étude de documents.

Il est également possible d'envisager une activité coopérative pour traiter l'ensemble des étapes proposées ici et/ou les différents paramètres orbitaux.

Des expérimentations en ExAO peuvent également être mises en place pour montrer le rôle de la température dans la dissolution des gaz.

Les mêmes démarches que celles décrites pour l'utilisation de Simclimat pour mettre en évidence les causes des variations climatiques Quaternaire peuvent être mises en œuvre pour analyser les variations climatiques du Cénozoïque, du Mésozoïque et du Paléozoïque. Dans cette ressource, nous ne détaillons pas à nouveau ces démarches mais indiquons ci-après quelques éléments clés pour les conduire.

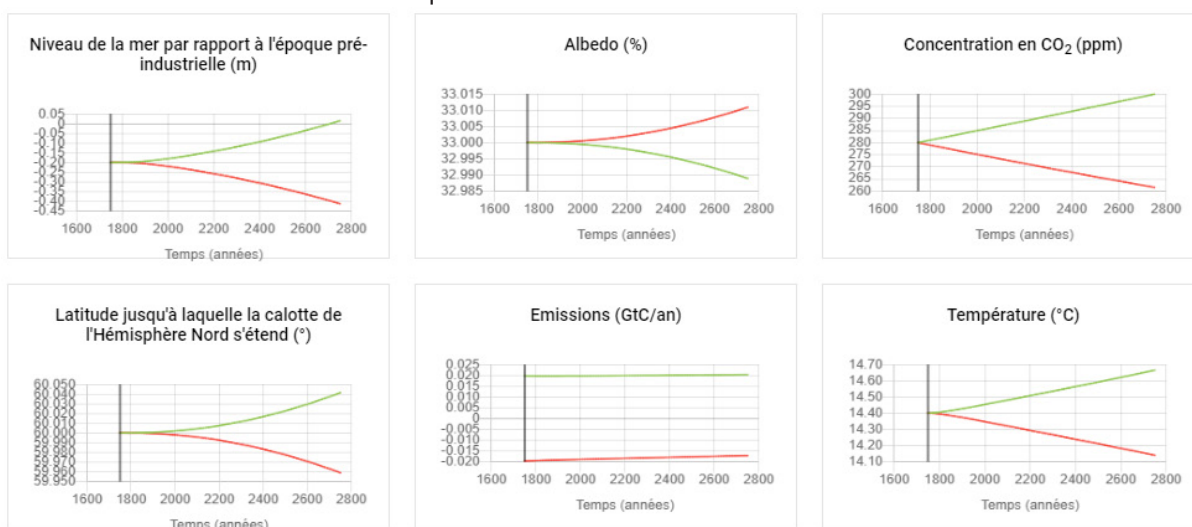


## Simclimat et les variations climatiques du Cénozoïque

### Connaissances

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 la température moyenne du globe. Celle-ci apparaît associée à une baisse de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> en relation avec l'altération des matériaux continentaux, notamment à la suite des orogénèses du Tertiaire. De plus, la variation de la position des continents a modifié la circulation océanique.

L'effet de l'altération continentale peut être mis en évidence avec le logiciel Simclimat. En partant d'une situation initiale de climat à l'équilibre (préindustriel), on peut réaliser deux simulations dans lesquelles on fait varier l'intensité de l'altération continentale.



Légende :

- en vert : altération continentale comme aujourd'hui ;
- en rouge : altération continentale deux fois plus importante qu'aujourd'hui.

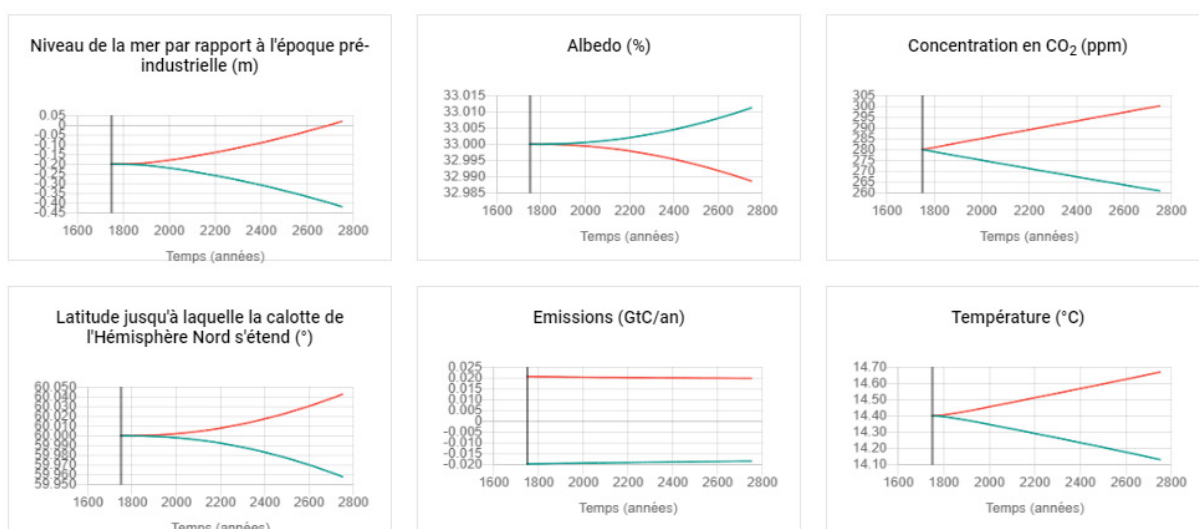
La comparaison des résultats nous permet de déduire qu'une augmentation de l'intensité de l'altération continentale conduit à un refroidissement par le biais d'une réduction de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>.

## Simclimat et les variations climatiques du Mésozoïque

### Connaissances

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.

L'effet de l'influence de l'activité des dorsales peut être mis en évidence avec le logiciel Simclimat. En partant d'une situation initiale de climat à l'équilibre (préindustriel), on peut réaliser deux simulations dans lesquelles on fait varier l'intensité du volcanisme et de l'activité des dorsales.



Légende :

- en vert : intensité du volcanisme nulle;
- en rouge : intensité du volcanisme 2 fois plus importante qu'aujourd'hui (0,17 Gt/an).

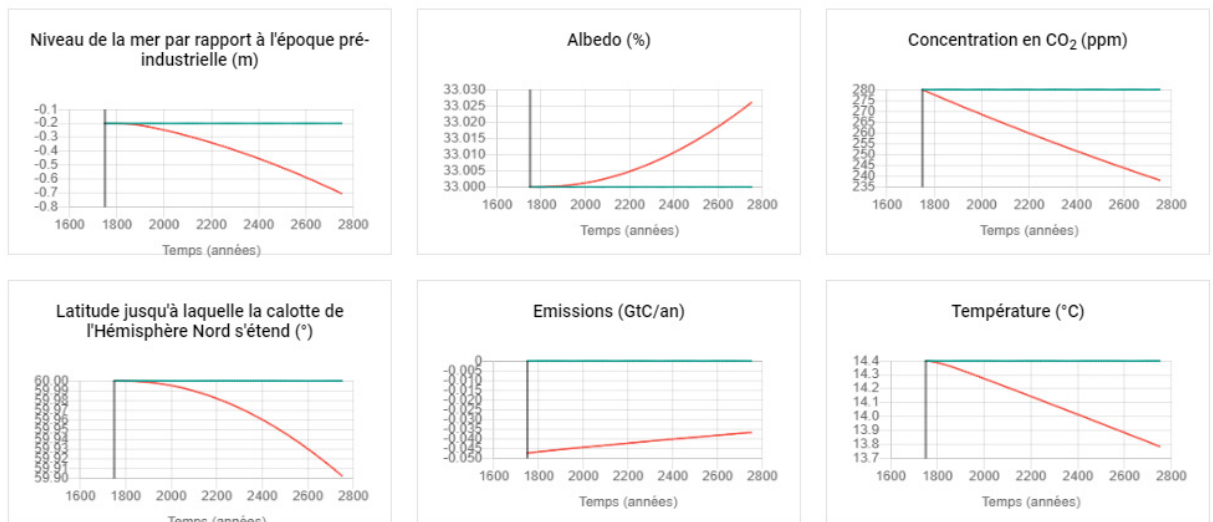
La comparaison des résultats nous permet de déduire qu'une augmentation de l'intensité du volcanisme conduit à un réchauffement par le biais d'une augmentation de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>.

## Simclimat et les variations climatiques du Paléozoïque

### Connaissances

Au Paléozoïque, des indices paléontologiques et géologiques, corrélés à l'échelle planétaire et tenant compte des paléo latitudes, 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.

L'effet de l'influence du stockage biologique du carbone peut être mis en évidence avec le logiciel Simclimat. En partant d'une situation initiale de climat à l'équilibre (préindustriel), on peut réaliser deux simulations dans lesquelles on fait varier l'intensité du stockage biologique du carbone.



Légende :

- en vert : intensité du stockage biologique du carbone nul;
- en rouge : intensité du stockage biologique du carbone comme au Carbonifère (0,71 Mt/an/ppm).

La comparaison des résultats nous permet de déduire qu'une augmentation de l'intensité du stockage biologique du carbone conduit à un refroidissement par le biais d'une réduction de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>.