

## Pourquoi notre planète est-elle à 15 °C ?

Ce TP est long, ne perdez pas de temps. À l'issue de la séance, vous me rendrez un compte-rendu détaillé montrant les résultats détaillés de vos recherches et votre théorisation.

### 1. Hypothèse : La Terre est en équilibre thermique : elle reçoit de l'énergie solaire et en perd exactement autant vers l'espace.

Nous allons d'abord examiner ce qui se passerait sur une Terre sans atmosphère. Pour étudier cette question, ouvrez le modèle 1 (TempTer01.STM).

Examinez la figure affichée sur l'écran. L'énergie de la Terre est la quantité de chaleur que celle-ci possède dans sa surface rocheuse ou marine.

1.1. Cette énergie peut s'accroître grâce au phénomène noté Soleil Vers Terre. À votre avis, sous quelle forme le Soleil envoie-t-il de l'énergie à la Terre ?

1.2. Cette énergie peut décroître grâce au phénomène noté Terre Vers Espace. Savez-vous sous quelle forme la Terre émet-elle de l'énergie vers l'espace ?

Pour connaître les résultats que fournit ce modèle, cliquez sur le triangle pointe en haut de la marge gauche (au-dessus de  $\chi^2$ ). Pour mettre en marche **TOUCHE RUN**, pour arrêter, **TOUCHE STOP**.

Vous pouvez voir le comportement de la Terre indiqué par ce modèle : à quelle température la Terre se stabilise-t-elle ? (NOTE : La température affichée est celle du sol ou de la mer, en moyenne. Elle est exprimée en degrés Kelvin :  $0\text{ °C} = 273\text{ °K}$  ; pour obtenir la température en Celsius, il suffit donc de soustraire 273 au nombre affiché)

1.3. Que se passe-t-il quand le flux entrant est supérieur au flux sortant ? S'il est inférieur ?

Pour le visualiser, cliquez sur le coin inférieur gauche du graphique : expliquez ce qui se passe.

1.4. Ce modèle permet-il de comprendre pourquoi la Terre est à 15°C ? Alors...

### 2. [paragraphe supprimé dans les TP de 1¼ heure] Hypothèse : le modèle est pour l'instant inexact parce que la couche réchauffée par le Soleil est plus épaisse (ou moins épaisse) dans la réalité que dans le modèle.

La chaleur "gagnée" réchauffe les roches et l'eau et provoque un accroissement de température (attention à ne pas confondre chaleur et température). On a considéré dans un premier temps que la couche ainsi réchauffée mesure 100 mètres d'épaisseur. C'est une supposition simplificatrice de faire comme si la Terre était équivalente à une couche d'eau (ou de roche) de 100 mètres d'épaisseur. Faites varier cette épaisseur pour voir ce que ça change.

Notez vos observations.

Maintenant écrivez un paragraphe pour indiquer si vous pensez que c'est convenable de choisir 100 mètres pour ce paramètre.

### 3. Hypothèse : le modèle est pour l'instant inexact parce que l'atmosphère joue un rôle.

Le modèle que nous venons d'utiliser conduit à une température d'équilibre nettement plus froide que la température actuelle du Globe. Cette "erreur" peut-elle être due à l'absence d'atmosphère dans le premier modèle ? Fermez le modèle et ouvrez les fichiers

TempTer02.STM

3.1. Allez examiner le modèle pour voir le stock "atmosphère" et les flux. Repérez bien l'énergie de la lumière visible et l'énergie des infrarouges. Quels sont les changements par rapport au modèle 1 ?

3.2. Laissez le curseur **CoefAbsAtm** sur 0 et **AlbédoPlnt** sur 0.33 (ne vous inquiétez pas de la signification de cette valeur, elle fait l'objet du paragraphe 4). **CoefAbsAtm** indique le pourcentage de rayons infrarouges absorbés par l'atmosphère. Faites tourner le modèle.

Pourquoi la Terre reste-t-elle si froide ? Expliquez pourquoi le réglage de **CoefAbsAtm** sur 0 conduit à cette température d'équilibre.

- 3.3. L'atmosphère précédente était absolument transparente aux IR. En réalité, l'atmosphère laisse bien passer la lumière visible qui arrive du Soleil mais absorbe une grande partie des rayons infrarouges provenant du sol terrestre. **CoefAbsAtm** règle cette absorption : Si aucun infrarouge n'était absorbé, on aurait **CoefAbsAtm = 0**. Trouvez la valeur précise pour laquelle on obtient la valeur réelle de la température atmosphérique actuelle : 15 °C. (ou peut le rentrer au clavier). Vous indiquerez à l'aide d'une phrase complète la signification de cette valeur.

ATTENTION : Ce modèle est encore extrêmement simplifié : atmosphère à une seule couche ; atmosphère tout à fait transparente aux rayons visibles ; rayonnement du sol uniquement dans l'infrarouge et aucune conduction entre le sol et l'atmosphère...

- 3.4. Peut-on rejeter l'hypothèse 3 ? Peut-on l'accepter ?

#### 4. Hypothèse alternative : le modèle est pour l'instant inexact parce que la couleur moyenne (l'albédo) de la Terre doit être fixée à une autre valeur.

Lorsque la lumière du Soleil rencontre une planète, une partie rebondit sur les hautes couches de l'atmosphère, une partie va au sol, mais rencontrant par exemple une surface neigeuse retransverse l'atmosphère et ressort vers l'espace sans pénétrer dans le sol. Cet effet dépend de la **brillance** de la planète. Pour simplifier, une planète très blanche (à cause des nuages ou de la neige) réfléchit très fortement la lumière. Au contraire une planète très sombre capte la lumière pour la transformer en infrarouges. Un albédo de 1 correspond à une planète blanche, un albédo de 0 à une planète absolument noire.

|                        |      |
|------------------------|------|
| Océan                  | 0.07 |
| Forêt de Conifères     | 0.12 |
| Prairie                | 0.20 |
| Surfaces glacées       | 0.30 |
| Sable du désert        | 0.32 |
| Neige tassée, vieille  | 0.59 |
| Nuages (stratus)       | 0.60 |
| Neige fraîche          | 0.80 |
| Nuages (cumulo-nimbus) | 0.92 |

- 4.1. À l'aide de ce tableau estimez quel serait l'albédo de la planète Terre, a) si elle était couverte de nuages, b) si sa surface était glacée ou enneigée (Snowball), c) si elle était recouverte de sable (Dune), d) si elle était couverte de mer (Waterworld) e) pour une autre répartition que vous imaginerez. Faites deux ou trois estimations de ce que pourrait être ou de ce que pourrait réellement devenir l'albédo de la Terre pour avoir un intervalle de valeurs vraisemblables.
- 4.2. Vous pouvez maintenant expérimenter pour estimer quelle serait la température d'une planète un peu plus couverte de neige et de banquise, ou bien plus couverte de forêt ; ou bien encore si la Terre voyait sa couverture nuageuse augmenter ou diminuer des quelques pour cent.
- 4.3. Peut-on rejeter cette hypothèse n°4 ? Peut-on l'accepter ?

Conclusion provisoire : Que doit-on penser du modèle TempTer02.STM avec **CoefAbsAtm** sur la valeur du §3 et **AlbédoPlnt** sur 0.33 ?

## Utilisation du modèle à des fins de prévisions :

### 5. **Modification de l'effet de serre terrestre pendant les prochains siècles.**

La concentration actuelle de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> est de 360 ppm. Elle était inférieure à 290 ppm avant l'ère industrielle et on a des preuves fortes que ce sont les rejets de dioxyde de carbone dus aux industries et aux transports qui sont responsables de cette augmentation. Comme les pays développés ne sont pas prêts à renoncer à leur confort, cette concentration va continuer d'augmenter.

L'action sur **CoefAbsAtm** n'est pas absolument connue : les modèles que vous avez utilisés sont calibrés pour [CO<sub>2</sub>] = 330 ppm. On estime que si cette valeur double, la valeur de **CoefAbsAtm** augmentera de 0.03 à 0.06. (c'est-à-dire deviendra valeur du §3 + 0.03 par exemple). À l'aide du modèle, décrivez les scénarios possibles.

### 6. [paragraphe facultatif si vous avez entraîné] **L'éruption du Pinatubo.**

Le 15 juin 1991, une éruption du volcan Pinatubo projeta des quantités gigantesques de cendres dans la haute atmosphère. Celles-ci mirent plusieurs années avant de retomber sur le sol de tous les continents après avoir tourné longtemps tout autour de la planète. Ce nuage presque invisible fit diminuer la quantité de lumière parvenant au sol de quelques pour cents. Le fichier TempTer03.STM vous permet de voir ce qui se passe si la transparence de l'atmosphère est diminuée de quelques pour cent. Vous pouvez filtrer de 0 à 5 % de la lumière visible avec le curseur **Effet Pinatubo %**.

### 7. [paragraphe facultatif si vous avez entraîné] **Le petit âge glaciaire ; les variations de l'activité solaire.**

Au 18<sup>ème</sup> siècle, l'activité solaire était environ 0.25% inférieure à ce qui se passe actuellement. Il existe de surcroît un cycle d'activité solaire d'une longueur de 11 ans pendant lequel la constante solaire varie de  $\pm 0.15\%$ . C'est-à-dire passe de  $4.342 \cdot 10^{10}$  à 4.335 ou 4.348

8. Albert Jacquard, pour parler de la Terre l'appelle "notre vaisseau spatial à tous" (et nous n'en avons qu'un seul). Albédo des planètes. Les paragraphes précédents mettent en évidence les fragilités de ce petit vaisseau qui nous abrite dans l'espace.

Vous ferez une synthèse du travail précédent pour montrer quelles sont exactement les fragilités de la Terre (et aussi au besoin ce qu'elles ne sont pas).

Pour que votre compte-rendu soit complet, vous y ajouterez un paragraphe pour me dire ce que vous avez pensé de ce travail :

- ☺ Est-ce que cela vous a paru scientifique ? Pourquoi ?
- ☺ Est-ce que la représentation des modèles vous a paru difficile ? Pourquoi ?
- ☺ Est-ce que les compétences en informatique nécessaires pour ce travail vous ont paru trop élevées ?
- ☺ Avez vous d'autres remarques ?

Peut-on se servir de ce modèle sur les autres planètes ?

### Albédo des planètes. Leurs atmosphères. (Fichier PLANÈTES.STM)

Maintenant que nous avons repéré les facteurs importants qui déterminent la température de la Terre, nous pouvons voir s'ils s'appliquent aux autres planètes. À l'aide des valeurs suivantes, vous vérifierez si l'on obtient des résultats compatibles avec la réalité. (On considérera que le modèle étant simplifié une différence de quelques degrés n'est pas significative). La pression et la composition atmosphérique vous permet d'estimer CoefAbsAtm

|                                    | Mercure      | Vénus  | Terre  | Mars  | Jupiter                      | Saturne                     | Neptune  |
|------------------------------------|--------------|--|--|---|------------------------------|-----------------------------|--|
| <b>Distance au Soleil (UA)</b>     | 0.35         | 0.72   | 1  | 1.52  | 5.2                          | 9.53                        | 30.06  |
| <b>Diamètre</b>                    | 0.38         | 0.95   | 1  | 0.53  | 11.27                        | 9.44                        | 3.88   |
| <b>Albedo</b>                      | 0,10         | 0.65   | 0.33   | 0,15  | 0.52                         | 0.47                        | 0.41   |
| <b>Température moy</b>             | 179°C        | 482°C  | 15°C   | -63°C   | -121°C                       | -125°C                      | -153°  |
| <b>Pression atmosphère</b>         | <b>0.001</b> | <b>92</b>                                      | 1  | <b>0,007</b>  | 0.7                          | 1.4                         | Entre 1 et 3                                       |
| <b>Composition de l'atmosphère</b> |              | <b>CO<sub>2</sub> 96%</b><br>N <sub>2</sub> 3% | N <sub>2</sub> 78 %<br>O <sub>2</sub> 21%<br>Autres 1% | <b>CO<sub>2</sub> 95 %</b><br>N <sub>2</sub> 2,7%<br>Argon 1,6%<br>O <sub>2</sub> 0.03%<br>Eau 0,00025% | H <sub>2</sub> 90%<br>He 10% | H <sub>2</sub> 97%<br>He 3% | H <sub>2</sub> 85%<br>He 13%<br>CH <sub>4</sub> 2% |
| <b>CoefAbsAtm</b>                  |              |  | 0,8183   |   |                              |                             |  |

Vous voyez que pour certaines planètes (lesquelles ?) le modèle ne donne pas un bon résultat. Examinez les schémas du modèle et proposez des hypothèses : que faut-il modifier ou bien ajouter dans ce modèle pour qu'il donne un meilleur résultat ?

### 9. [paragraphe facultatif si vous avez entraîné] Et si la Terre avait été ailleurs ?

Vous envisagerez que lors de la formation du système solaire, la Terre aurait pu être un peu différente : un peu plus grosse ou plus petite, un peu plus proche du soleil, ou un peu plus éloignée. Faites une évaluation exacte des conséquences que cela aurait eu sur la température de la Terre.

### 10. Effets de la neige, des nuages, des transgressions : boucles de rétroactions.

Remplissez d'abord les blancs de ce texte :

1. Quand la température de surface diminue, la quantité de neige ----- ; quand la quantité de neige -----, l'albédo de la Terre ----- . Quand l'albédo de la Terre -----, la température -----.
2. Quand la température de la Terre augmente, la quantité de nuages -----, et donc l'albédo de la haute atmosphère ----- . Quand cet albédo -----, il y a ----- de lumière visible qui arrive au sol et ce qui provoque son -----.
3. Quand la température de la planète diminue, les déserts chauds (Sahara) régressent et se couvrent de végétation, les forêts sombres (Taïga) gagnent en superficie. Cela provoque une ----- de l'albédo du sol, qui à son tour fait ----- la température de la Terre.

4. Quand la température croît, la vapeur d'eau de l'atmosphère devient plus -----.  
La quantité de vapeur d'eau atmosphérique a un effet ----- sur la température planétaire.

Ensuite, réfléchissez bien : ces phrases se résument à « quand la Terre se réchauffe, cela fait augmenter la température de la Terre ». (Ceci s'appelle une boucle de rétroaction positive.) Ou bien « quand la Terre se réchauffe, cela fait diminuer la température de la Terre » (Boucle négative). Parmi les quatre paragraphes précédents, où trouve-t-on des boucles positives, où des boucles négatives ? Quel est l'effet global d'une boucle négative ? d'une boucle positive ? Maintenant, essayez de prédire comment va se comporter un modèle où l'on implémente ces boucles. Expliquez votre prévision avec **beaucoup** de détails.

Maintenant, vous pouvez vous servir du modèle BOUCLE.STM. La façon exacte dont la neige où les nuages dépendent de la température de la Terre est difficile à estimer. Ce modèle sert à savoir si ce sont des paramètres "sensibles".

Par exemple, vous pouvez redessiner (c'est-à-dire modifier) les courbes qui montrent comment l'albédo, les nuages et l'humidité atmosphérique dépendent de la température (ATTENTION, en °K)

### **L'influence des nuages :**

Lorsque des nuages sont présents, ils font écran à l'émission du sol ce qui maintient la température plus chaude. Par contre, en augmentant l'albédo de la planète, ils diminuent l'énergie solaire absorbée et ils ont tendance à la refroidir. L'albédo terrestre est pour les 2/3 le fait de l'atmosphère et en particulier des nuages.

Deux types de nuages interviennent principalement :

Les stratocumulus sont des nuages bas, peu épais (quelques centaines de mètres) mais très étendus (près de 20% de la surface du globe). Leur réflectivité est de l'ordre de 40 à 50% ce qui contraste très fortement avec la réflectivité de la mer. Ils ont donc un fort effet d'albédo.

Les cirrus, au contraire, sont les nuages les plus élevés. Ils couvrent, eux aussi, environ 20% de la surface du globe. Ils sont composés de cristaux de glace ; leur effet de serre est considérable. Par ailleurs, les cirrus sont souvent assez transparents au rayonnement solaire (on voit souvent le Soleil au travers) et leur effet d'albédo est faible.

Les mesures du bilan radiatif effectuées depuis satellite ont permis d'évaluer l'effet d'albédo et l'effet de serre des nuages existants. On a ainsi déterminé le « forçage radiatif des nuages », c'est-à-dire la variation du bilan radiatif de la Terre qui résulterait d'une disparition de tous les nuages. Il comporte une composante courtes longueurs d'onde et une composante grandes longueurs d'ondes infrarouge. La première est négative car les nuages diminuent l'énergie absorbée, la deuxième est positive puisqu'elle traduit un effet de serre. Les deux termes sont très grands: en moyenne annuelle, environ  $-47 \text{ Wm}^{-2}$  pour l'effet d'albédo et  $+29 \text{ Wm}^{-2}$  pour l'effet de serre. Globalement donc, l'effet d'albédo l'emporte et l'effet résultant des nuages est de refroidir la planète. Si, instantanément, ils devenaient transparents, le bilan radiatif augmenterait de  $18 \text{ Wm}^{-2}$ .

La question est donc : s'il y a un réchauffement, que deviendront la couverture nuageuse, le type et la répartition des nuages et comment, cela réagira-t-il en retour sur le bilan radiatif?

Si ce sont les nuages bas qui sont avantagés, l'effet d'albédo peut augmenter, le forçage radiatif des nuages deviendrait alors davantage négatif ce qui tendrait à refroidir la planète et la rétroaction serait négative. Au contraire, si ce sont les nuages hauts qui le sont, c'est l'effet de serre des nuages qui augmentera et la rétroaction sera positive, tendant à augmenter encore le réchauffement. Le problème reste ouvert et constitue la principale cause d'incertitude quant à la réponse à court terme des modèles qui se révèlent extrêmement sensibles à la façon dont les nuages sont représentés.