

INTRODUCTION: CHOIX PÉDAGOGIQUES

Le chapitre 5 s'inscrit dans le Thème 2 du programme: Le Soleil, notre source d'énergie. Le but de ce chapitre est d'identifier les différents phénomènes qui entrent en jeu dans le bilan radiatif terrestre de façon à comprendre comment la température de la planète dépend de ce bilan, et le rôle de chaque facteur (albédo, effet de serre, etc). Ce chapitre se découpe en 4 unités.

L'unité 1 permet de calculer la puissance radiative moyenne par m² reçue au niveau de la Terre de la part du Soleil. L'objectif derrière ces calculs est que l'étudiant réalise que la Terre ne reçoit qu'une petite partie de l'énergie totale rayonnée par le Soleil, et ce à cause de considérations géométriques (éloignement du Soleil, surface efficace de la planète, etc).

L'unité 2 met en évidence l'importance de l'albédo dans son rôle pour diminuer l'énergie absorbée par la planète, et ainsi être un facteur participant à limiter une hausse en température. Elle prend la forme d'une tâche complexe qui peut donner lieu à une communication orale éventuelle (Powerpoint, ou autre), ou une production écrite argumentée.

L'unité 3 met en évidence les différences de comportements entre la partie UV-visible et la partie infrarouge des rayonnements au niveau du sol et de l'atmosphère terrestre. Elle prépare ainsi l'introduction du mécanisme de l'effet de serre (délicat à bien comprendre pour l'étudiant en général), qui implique uniquement la partie infrarouge du spectre rayonné/absorbé.

L'unité 4 décrit finalement l'effet de serre et son rôle dans le bilan radiatif terrestre, ainsi que la notion d'équilibre dynamique et le lien entre le bilan radiatif terrestre et la température moyenne de la planète. Elle se termine avec une ouverture sur le déséquilibre induit par un changement dans l'effet de serre et l'idée d'un régime transitoire vers un état d'équilibre différent (notamment en température).

POUR COMMENCER

- 1. → a.
- 2. → b.
- 3. → b.
- 4. → c.

UNITÉ 1

Activité guidée

1. $P_{\text{Surf}} = \frac{P_{\text{tot}}}{4\pi d^2}$ 2. $P_{\text{S-T}} = \frac{3,86 \times 10^{26}}{4\pi \times (150 \times 10^9)^2} = 1\,365\text{ W}$

3. On observe le même diamètre de l'ombre portée par une sphère ou un disque de même rayon. Donc, on a la même puissance manquante derrière chaque dispositif. Ainsi, on a la même puissance captée par la sphère ou le disque de rayon identique.

Remarque: La raison est que la sphère offre plus de surface à l'éclairement, mais avec un angle d'incidence variable qui minimise la puissance reçue par unité de surface. On peut montrer par un calcul que les deux situations sont identiques quant à la puissance reçue.

4. $P_{\text{tot Terre}} = P_{\text{S-T}} \cdot \pi \cdot R_T^2 = 1\,365 \cdot \pi \cdot (6\,371 \cdot 10^3)^2 = 1,74 \cdot 10^{17}\text{ W}$.

5. En utilisant les relations obtenues dans les questions 1 et 4, on obtient :

$$P_{\text{tot Planète}} = \frac{P_{\text{tot}}}{4\pi d^2} \cdot \pi \cdot R^2 = \frac{P_{\text{tot}}}{4} \cdot \left(\frac{R}{d}\right)^2,$$

avec d la distance planète-Soleil et R le rayon de la planète. Si on double la distance au Soleil, et aussi le rayon de la planète, on ne change pas la puissance totale reçue. Ainsi, on montre que d et R ont la même importance dans la puissance totale reçue par la planète. On peut s'en rendre compte en comparant la Terre et Saturne, par exemple.

UNITÉ 2

Critères d'évaluation pour l'enseignant

DÉMARCHE

- Pertinence:** qui répond à la question posée
- Cohérence:** pas de grosse erreur (enchaînement logique des idées et mise en relation correcte des informations)

Exposé PowerPoint

- Utilisation de liens logiques à l'écrit.
- Utilisation de liens logiques à l'oral.
- Présentation convaincante pour l'auditoire.
- Ouverture sur des questions en fin d'exposé.

CONTENU

- Suffisance:** assez d'éléments (quand les attendus sont nombreux ou si la tâche propose des choix)
- Complétude:** tous les éléments (quand les attendus sont peu nombreux)

Éléments scientifiques attendus tirés des documents du livre (ou de la ressource numérique) et/ou des connaissances

Doc 1: La puissance incidente est la même pour le papier blanc ou noir. Or, le papier noir s'enflamme beaucoup plus vite, ce qui prouve que la puissance absorbée sous forme de chaleur est bien plus grande pour le papier noir que pour le blanc. De plus, on peut dire dans ce cas que $P_{\text{incidente}} = P_{\text{absorbée}} + P_{\text{diffusée}}$. Ainsi, on conclut que la surface blanche diffuse plus de puissance que la surface sombre, ce qui est en accord avec la phrase de légende «La tâche lumineuse sur le papier blanc est plus intense que sur le papier noir». On montre ainsi que l'albédo est plus élevé pour une surface claire.

Docs 2, 3 et 4: La mer paraît sombre sur une photo satellite car l'albédo de l'eau à la verticale est très faible (0,03 à 0,05), donc il y a très peu de lumière qui est diffusée par l'eau vers le satellite. En revanche, on prend facilement un coup de Soleil à la plage car l'albédo de l'eau en incidence horizontale est fort (0,5 à 0,8). De même au ski, où l'on est exposé non seulement au soleil direct, mais aussi à la diffusion de la lumière solaire par la neige (albédo supérieur à 0,8).

Doc 4: l'albédo de la planète Terre est une moyenne d'environ 0,30 sur une année. Ainsi, la planète renvoie vers l'espace une puissance moyenne de $1,74 \cdot 10^{17} \times 0,30 = 5,22 \cdot 10^{16}\text{ W}$, et absorbe donc finalement une puissance de :

$$1,74 \cdot 10^{17} - 5,22 \cdot 10^{16} = 1,22 \cdot 10^{17}\text{ W}$$

UNITÉ 3

Activité guidée

Doc 5 : Plus l'albédo d'une surface éclairée est faible, plus la surface absorbe de l'énergie sous forme de chaleur, et plus elle monte en température. Si l'on veut éviter une hausse de température, on a intérêt à augmenter l'albédo des surfaces en ville, comme pour la planète. Il faut privilégier les surfaces claires.

Doc 6 : La fonte des pôles est un cercle vicieux, car plus la calotte glaciaire fond, plus l'albédo terrestre baisse, donc plus la planète absorbe d'énergie sous forme de chaleur, ce qui contribue à augmenter encore plus la température...

Connaissances personnelles éventuelles : Rôle positif des nuages sur l'albédo, porter des vêtements clairs en été, voir la Lune et les autres planètes grâce à leur albédo, etc

COMMUNICATION

Précision : utilisation unité de valeur, valeurs données, argument précis...

Clarté : sens, lisibilité du texte (et/ou du schéma...)

Conformité : la représentation répond aux règles d'usages

Forme de la présentation PowerPoint

- Pas plus d'une idée par diapo.
- On attend une diapo d'introduction, et une de conclusion.
- Pas de phrases rédigées sur les diapos, seulement des mots-clés, des données chiffrées, des symboles visuels.
- Choix du fond de diapo en cohérence avec le thème, et équilibre visuel réussi (photos, schémas, etc) pour chaque diapo.
- Respect de l'orthographe à l'écrit.
- Aisance à l'oral.

Voici un exemple de grille d'évaluation de réussite qui doit rester indicative, et non sommative. Elle peut être distribuée aux élèves qui présentent leur travail pour une auto-évaluation et/ou à la classe pour une discussion sur les points satisfaisants et les pistes de progrès éventuelles :

Niveaux de réussite	DÉMARCHE	CONTENU	COMMUNICATION
	Synthèse, démarche explicative, exposé, présentation...	Éléments scientifiques tirés des documents et/ou des connaissances	Forme de la représentation (texte, schéma, tableau, diaporama, graphique...)
1	Ne répond pas à la question posée	Absents	Non conforme
2	Démarche maladroite et partielle à la question posée	Incomplets soit / connaissances soit / extraction d'information des documents	1 critère (parmi les trois: précision, clarté, conformité)
3	Démarche pertinente mais maladroite		2 critères (parmi les trois: précision, clarté, conformité)
4	Démarche à la fois pertinente et cohérente	Complets ou suffisants	3 critères (précision, clarté, conformité)

1. Le jour, le spectre de la planète montre une partie dans l'UV-visible (autour de 625 nm), qui correspond au rayonnement diffusé par la Terre vers l'espace grâce à l'albédo terrestre. Il n'est présent que le jour, quand la planète est éclairée par le Soleil. L'autre partie (autour de 10 000 nm) correspond à de l'IR, et est émise de jour comme de nuit: c'est le rayonnement thermique de la planète dû à sa température de surface (loi de Wien, voir chapitre précédent).

2. On relève graphiquement :

$$\lambda_{\max} = 10\,000\text{ nm} = 10\ \mu\text{m} = 10 \cdot 10^{-6}\text{ m.}$$

Dans la loi de Wien, il vient: $T = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 289,8\text{ K}$ soit : $289,8 - 273,15 = 16,6\text{ }^\circ\text{C}$.

La température moyenne du sol est d'environ $+16\text{ }^\circ\text{C}$.

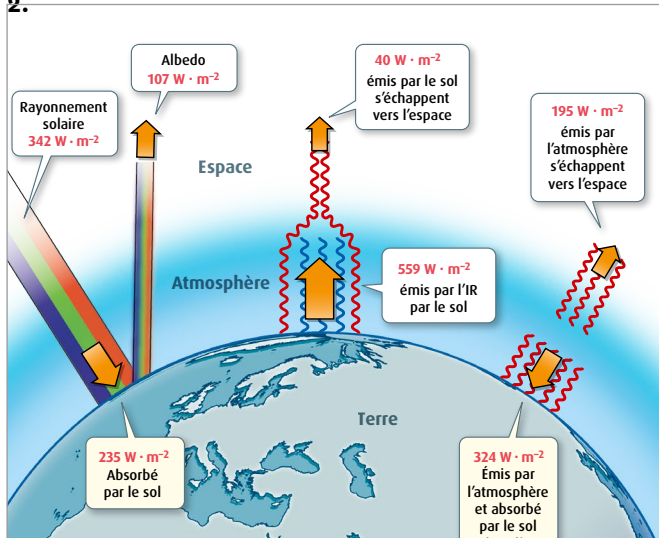
3. On constate que plus la température du corps noir augmente, plus l'aire sous son spectre d'émission augmente, donc plus la puissance rayonnée par ce corps noir augmente. Ainsi, plus la température du sol augmente, plus la puissance rayonnée par le sol dans l'IR augmente.

4. Le spectre en rouge est un spectre d'émission de corps noir classique: la Terre émet un spectre de corps noir classique au niveau du sol. Le spectre en bleu présente des bandes manquantes: elles correspondent aux longueurs d'onde absorbées par les gaz présents dans l'atmosphère (en particulier, CO_2 absorbe vers $15\ \mu\text{m}$ et O_2 et O_3 vers $10\ \mu\text{m}$). Cela montre clairement que l'atmosphère terrestre absorbe une partie de la puissance rayonnée dans l'IR par le sol, qui ne s'échappe ainsi pas de la planète vers l'espace.

UNITÉ 4

1. Le sol absorbe une partie du rayonnement solaire dans l'UV-visible, et aussi une partie du rayonnement de l'atmosphère dans l'IR.

2.



3. On constate que toute la puissance entrante depuis l'espace ($342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) est exactement égale à la puissance totale sortante vers l'espace ($107 + 40 + 195 = 342 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Ainsi, la planète est dans un état de régime permanent dans son équilibre dynamique.

4. Si la Terre n'avait pas d'atmosphère, elle aurait à peu près la même température moyenne que la Lune. L'échange de puissance entre l'atmosphère et le sol terrestre dans l'IR permet de stocker en quelque sorte un surplus d'énergie sous forme thermique et de garantir ainsi une température globale plus élevée. C'est l'effet de serre.

5. Depuis 1900, la température moyenne de la Terre est en augmentation significative (de 1°C environ, alors que l'incertitude est au pire de $0,8^\circ\text{C}$ historiquement). Puisque la température évolue depuis 1900, la Terre n'est pas dans un régime permanent, mais transitoire de type réchauffement : elle absorbe plus d'énergie qu'elle n'en renvoie vers l'espace. En fait, on observe une corrélation entre la hausse de température de la planète et la teneur en CO_2 dans l'atmosphère. Or, on sait que le CO_2 absorbe les longueurs d'onde vers $15 \mu\text{m}$. Ainsi, plus de CO_2 dans l'atmosphère veut dire plus d'énergie absorbée dans l'IR par l'atmosphère, et ainsi une élévation de la température globale de la planète.

Tester ses savoirs

1 Vrai/faux

- Vrai.
- Faux, une surface claire absorbe moins d'énergie solaire qu'une surface sombre.
- Vrai.
- Faux, les spectres du rayonnement terrestre sont différents le jour et la nuit.
- Faux, dans un régime permanent la température reste constante au cours du temps.

2 Légender un schéma

- Rayonnement solaire, domaine visible.
- Rayonnement solaire réfléchi, domaine visible.
- Rayonnement thermique terrestre, domaine infrarouge.
- Rayonnement thermique atmosphérique, domaine infrarouge.
- Rayonnement thermique atmosphérique, domaine infrarouge.

3 QCM

- Faux.
 - Faux.
 - Faux.
 - Vrai.
- Faux.
 - Faux.
 - Faux.
 - Vrai.
- Faux.
 - Vrai.
 - Faux.
- Faux.
 - Vrai.
 - Faux.
 - Faux.
- Faux.
 - Faux.
 - Faux.
 - Vrai.

4 Question de synthèse

L'immense majorité de l'énergie sur Terre nous arrive du Soleil par rayonnement. La Terre ne reçoit qu'une fraction de la puissance totale émise par le Soleil à cause de sa petite taille et de son éloignement. La température de la planète est régie par un équilibre dynamique entre la puissance entrante et la puissance sortante. La puissance entrante est celle du rayonnement solaire dans l'UV-visible. La puissance sortante est de deux natures : dans l'UV-visible et dans l'infrarouge (IR). Dans l'UV-visible, la cause est l'albédo terrestre, qui renvoie une partie du rayonnement du Soleil (environ 30 %) vers l'espace. Dans l'IR, la cause est le rayonnement thermique (de type « corps noir ») du sol et de l'atmosphère. En fait, le sol et l'atmosphère rayonnent et absorbent dans l'IR à cause de leur température (environ 15°C). C'est l'effet de serre, qui permet des échanges supplémentaires d'énergie dans l'IR au niveau de la planète, et garantit une température d'équilibre plus élevée que sans atmosphère. La part de rayonnement IR qui s'échappe vers l'espace participe à la puissance sortante, et la Terre est en régime permanent avec une température moyenne stable si la puissance entrante est égale à la puissance sortante, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de stockage ou de perte d'énergie au niveau de la planète.

5

$$1. P_V = \frac{P_S}{4\pi d^2} = \frac{3,86 \cdot 10^{26}}{4\pi(1,08 \cdot 10^{11})^2} = 2\,633 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$2. P_T = P_V \cdot \pi \cdot R^2 = 2\,633 \cdot \pi \cdot (6\,052 \cdot 10^3)^2 = 3,03 \cdot 10^{17} \text{ W}$$

$$3. \text{Albédo: } \frac{2,27 \cdot 10^{17}}{3,03 \cdot 10^{17}} = 0,75$$

4. Vénus diffuse beaucoup plus de lumière que la Terre ou Mercure. D'ailleurs, c'est une des étoiles les plus brillantes dans le ciel.

6

On observe une différence entre la température calculée par le modèle du corps noir et celle mesurée dans l'expérience seulement pour les planètes qui présentent une atmosphère. Plus précisément, l'écart observé est d'autant plus important que l'atmosphère est épaisse et opaque (Vénus vs Mars). Cette observation s'explique par le phénomène de l'effet de serre. En effet, sans atmosphère, une planète rayonne dans l'IR à cause de sa température, et tout ce rayonnement s'échappe vers l'espace. En revanche, s'il y a une atmosphère, ce rayonnement IR va en partie être absorbé par certains gaz sous forme de chaleur, et l'atmosphère émettra aussi dans l'IR à cause de sa température. Ainsi, un nouveau point d'équilibre, à une température différente, s'établit grâce à cette énergie supplémentaire échangée dans l'IR entre le sol et l'atmosphère.

7

1. Une main a une température de 37 °C, donc elle émet un rayonnement dans l'IR comme un corps noir, et c'est ce rayonnement que l'autre main ressent.

2. Chaque main émet son propre rayonnement IR à cause de sa température, et absorbe celui de l'autre main. C'est le même type d'échange d'énergie par rayonnement que lors de l'effet de serre entre le sol et l'atmosphère.

8

1. Planète/espace: Arrivent: $340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
repartent: $101 + 199 + 40 = 340 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

2. Atmosphère: Arrivent: $79 + 20 + 84 + 358 = 541 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
repartent: $199 + 342 = 541 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

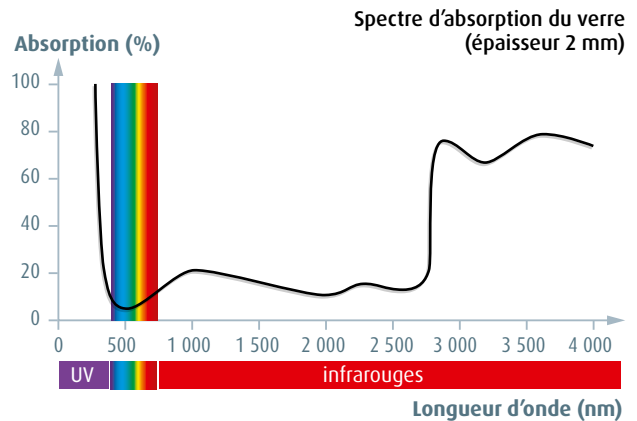
3. Sol: Arrivent: $160 + 342 = 502 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;
repartent: $20 + 84 + 358 + 40 = 502 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

4. Dans ce schéma, la planète est en régime permanent car il n'y a pas de stockage (positif ou négatif) d'énergie (voir question 1 : il rentre autant qu'il sort). La température de la planète est donc stable.

ÇA VOUS CONCERNE

– Recherchez pourquoi, dans le cas d'une serre en verre, le phénomène se rapproche davantage de ce qui se passe sur Terre.

Le spectre d'absorption du verre (ci-dessous) montre une augmentation de l'absorption dans les infra-rouges à partir de 2 700 nm. Donc de même que pour l'atmosphère, le verre retient effectivement l'énergie infra-rouge réémise par le sol. Le réchauffement d'une serre en verre est donc à la fois dû au fait que l'on retient l'air chaud (comme pour la serre en plastique) mais aussi au fait que le verre lui-même est chauffé en absorbant l'infra-rouge.



– Rechercher pourquoi l'Académie Nationale des Sciences Américaine juge que la géo-ingénierie dure est une solution risquée et insuffisante pour régler la question du réchauffement climatique

Si l'on reprend les termes exacts de l'Académie Nationale des Sciences, que l'on peut trouver dans le lien suivant (<https://www.nap.edu/read/18988/chapter/7#182>), il est indiqué que la géo-ingénierie dure est « irrationnelle et irresponsable » **si elle n'est pas accompagnée de mesures visant à limiter la production de CO₂ ou à le re-capturer**. Ce sont ces dernières mesures qui sont considérées comme étant de la géo-ingénierie douce, alors que toute mesure visant à augmenter l'albédo terrestre (dont le projet ICE911 fait partie) doit être considérée comme de la géo-ingénierie dure.

Cependant, on peut aussi faire la part des choses et considérer que vu le faible impact écologique de l'introduction de billes de silice (c'est du moins le discours tenu sur leur site web par les promoteurs du projet ICE911), matériau « naturel » et peu réactif, à la surface de la mer, ce projet offre moins de risque que d'autres projet dont on ne peut pas mesurer actuellement les conséquences et qui pourraient s'avérer plus irréversibles que l'usage des billes de silice (par exemple, emplir l'orbite terrestre d'un anneau de particules réfléchissantes, utilisation d'aérosols stratosphériques ou création de couches de nuages à partir de gouttelettes issues des océans).