



EQUILIBRES DYNAMIQUES

Des systèmes physiques aussi différents que le Soleil, la Terre ou le corps humain évoluent à température globalement constante. Pour autant, ces systèmes échangent de l'énergie avec leur environnement, et différentes transformations physico-chimiques ou nucléaires peuvent s'y produire. Le résultat est que l'énergie qu'ils contiennent peut changer en quantité et en nature au cours du temps, alors même que leur température reste constante. On parlera ici d'équilibre dynamique.

Cet essentiel détaille les principes physiques qui permettent ces états d'équilibre dynamique : comment la Terre reçoit autant de rayonnement électromagnétique qu'elle en émet (état globalement stationnaire), comment le rayonnement du Soleil est lié à la décroissance de son énergie de masse, et comment les pertes globales du corps humain dans le milieu ambiant sont liées la décroissance de son énergie chimique.

Mots-clés

Bilan d'énergie, transformations chimiques, transferts thermiques, rayonnement électromagnétique, corps noir, équilibre dynamique, albédo.

Références au programme

2.1 - Le rayonnement solaire

Savoirs

L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène qui se produisent dans les étoiles les aintient à une température très élevée.

Du fait de l'équivalence masse-énergie (relation d'Einstein), ces réactions s'accompagnent d'une diminution de la masse solaire au cours du temps.

Comme tous les corps matériels, les étoiles et le Soleil émettent des ondes électromagnétiques et donc perdent de l'énergie par rayonnement.

Le spectre du rayonnement émis par la surface (modélisé par un spectre de corps noir) dépend seulement de la température de surface de l'étoile.

La longueur d'onde d'émission maximale est inversement proportionnelle à la température absolue de la surface de l'étoile (loi de Wien).

2.2 - Le bilan radiatif terrestre

Savoirs

La proportion de la puissance totale, émise par le Soleil et atteignant la Terre, est déterminée par son rayon et sa distance au Soleil.

Une fraction de cette puissance, quantifiée par l'albédo terrestre moyen, est diffusée par la Terre vers l'espace, le reste est absorbé par l'atmosphère, les continents et les océans.

Le sol émet un rayonnement électromagnétique dans le domaine infra-rouge (longueur d'onde voisine de 10 μm) dont la puissance par unité de surface augmente avec la température.

Une partie de cette puissance est absorbée par l'atmosphère, qui elle-même émet un rayonnement infrarouge vers le sol et vers l'espace (effet de serre).

La puissance reçue par le sol en un lieu donné est égale à la somme de la puissance reçue du Soleil et de celle reçue de l'atmosphère. Ces deux dernières sont du même ordre de grandeur.

Un équilibre, qualifié de dynamique, est atteint lorsque le sol reçoit au total une puissance moyenne égale à celle qu'il émet. La température moyenne du sol est alors constante.

2.4 - Le bilan thermique du corps humain

Savoirs

La température du corps reste stable parce que l'énergie qu'il libère est compensée par l'énergie dégagée par la respiration cellulaire ou les fermentations.

Globalement, la puissance thermique libérée par un corps humain dans les conditions de vie courante, au repos, est de l'ordre de 100 W.

Le principe de conservation de l'énergie permet de faire des bilans d'énergie sur tous les systèmes envisageables : de la bactérie à l'amas de galaxies. Au sein d'un système, la nature de l'énergie peut évoluer lors de transformations physico-chimiques ou nucléaires. Le système peut aussi échanger de l'énergie avec son environnement. Ces notions seront mises en œuvre dans le cas de la Terre, du Soleil, et du corps humain.

Retrouvez éduscol sur



Principe de conservation de l'énergie – Notion d'équilibre dynamique

Conservation de l'énergie : bilan d'énergie

L'énergie est une grandeur qui se conserve. Ainsi, on peut effectuer un bilan sur tout système, sur une durée Δt :

$$\text{énergie}_{\text{finale}} = \text{énergie}_{\text{initiale}} + \text{énergie}_{\text{reçue}} - \text{énergie}_{\text{cédée}}$$

On peut alors définir la variation d'énergie du système durant Δt (variation d'énergie = énergie finale – énergie initiale), ce qui permet de réécrire ce principe de conservation de l'énergie :

$$\text{variation d'énergie} = \text{énergie}_{\text{reçue}} - \text{énergie}_{\text{cédée}}$$

En divisant cette égalité par la durée Δt considérée, on obtient alors :

$$\frac{\text{variation d'énergie}}{\Delta t} = \text{puissance}_{\text{reçue}} - \text{puissance}_{\text{cédée}}$$

Notion d'équilibre dynamique

Plusieurs cas sont alors possibles.

Le système est isolé.

Il ne reçoit pas d'énergie de la part de son environnement, et il n'en cède pas ; alors sa variation d'énergie est nulle. Pour autant, il est possible que l'énergie qu'il contient change de nature, en raison de transformations physico-chimiques ou nucléaires : c'est le cas d'un bécher dans lequel se produit une réaction chimique, à l'échelle de quelques secondes. Si le système ne subit aucune transformation, il est à l'équilibre thermodynamique : c'est le cas par exemple d'un liquide chaud dans une bouteille isotherme, à l'échelle de quelques minutes.

Le système n'est pas isolé, mais l'énergie cédée est égale à l'énergie reçue.

Alors sa variation d'énergie est nulle : son énergie est constante. Si de plus le système ne subit aucune transformation, l'énergie qu'il contient ne change pas de nature, et sa température reste constante. On peut parler d'**équilibre dynamique** : c'est dans l'ensemble le cas de la Terre, à l'échelle de quelques années.

Le système n'est pas isolé, et il y a déséquilibre entre l'énergie cédée et l'énergie reçue.

L'énergie du système varie. Dans certains cas, les transformations physico-chimiques ou nucléaires qui s'y produisent permettent de maintenir la température du système constante : on parlera là aussi d'**équilibre dynamique**. C'est le cas du Soleil, à l'échelle de millions d'années, ou du corps humain à l'échelle de quelques heures.

Réservoirs d'énergie, transformations et échanges d'énergie

Réservoirs d'énergie

L'énergie stockée par tout corps existe sous différentes formes :

- énergie interne (à l'échelle microscopique) ;
- énergie cinétique (ou énergie thermique) : la température absolue d'un corps au repos (bactérie, animal, planète ou encore étoile) traduit son niveau d'agitation thermique à l'échelle microscopique. Ainsi, dans le cas d'un gaz parfait, à température T , l'énergie cinétique moyenne d'une molécule est $3kT/2$ avec k la constante de Boltzmann (modèle cinétique du gaz parfait). Plus un corps est chaud, plus cette énergie cinétique microscopique est élevée ;
- énergie potentielle (que l'on peut la plupart du temps confondre avec l'énergie chimique) : l'énergie potentielle à l'échelle microscopique est mise en jeu lors des réactions chimiques ou des changements d'état (chaleur latente) ;
- énergie de masse ;
- énergie électromagnétique ;
- énergie cinétique à l'échelle macroscopique ;
- ...

Transformations

Un système peut subir différents types de transformation, induisant des changements dans la nature des énergies :

- **réactions chimiques ou changements d'état** : de l'énergie chimique peut être convertie en énergie thermique et réciproquement ;
- **réactions nucléaires** : de l'énergie de masse peut être convertie en énergie thermique.

Échanges d'énergie

Tout corps est susceptible d'échanger de l'énergie avec un autre corps, même sans échange de matière. Ces échanges peuvent être de différentes natures, et ils peuvent se faire aussi bien lorsque ces corps sont en contact (un objet chaud immergé dans un fluide plus froid par exemple) ou à distance (entre la Terre et le Soleil par exemple).

L'intensité de l'échange d'un corps A vers un corps B peut être quantifiée par l'énergie transférée de A vers B par unité de temps, c'est à dire par la puissance (en $J \cdot s^{-1} = W$) échangée. On peut aussi raisonner sur l'énergie échangée (en J) sur une durée donnée.

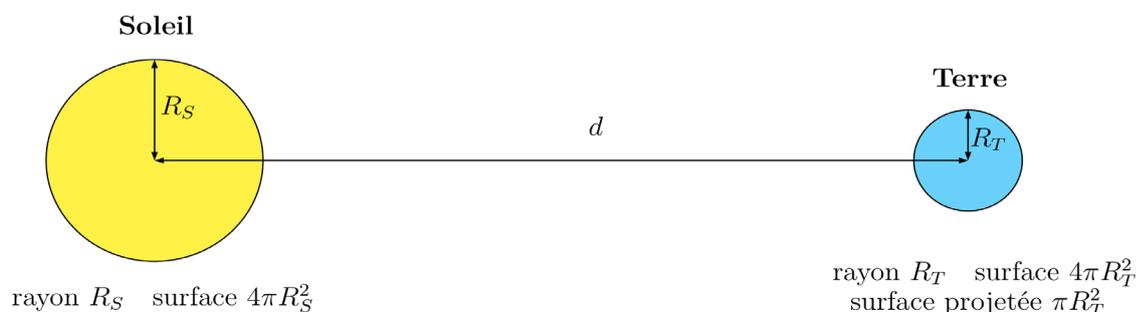
Cette puissance échangée entre deux corps est donc un **débit d'énergie**, ou encore un **flux d'énergie** (en W).

Deux modes d'échanges sont utilisés ici :

- **le transfert thermique par contact** : c'est le phénomène de diffusion, via l'agitation thermique moléculaire ;
- **le transfert thermique à distance via le rayonnement électromagnétique**.

Équilibre dynamique de la Terre

Dans cette partie, les notations utilisées pour la description du système Soleil-Terre sont présentées en figure 1. On a $d = 1,5 \cdot 10^{11} m$, $R_T = 6,4 \cdot 10^6 m$ et $R_S = 6,96 \cdot 10^8 m$.



Équilibre dynamique Terre

En première approximation, on peut négliger toute forme de transformations chimiques sur Terre, et négliger les réactions nucléaires qui s'y produisent. En considérant alors que la température moyenne de la Terre est constante à l'échelle de la dizaine d'années, on peut traduire son équilibre dynamique de la manière suivante, en raisonnant sur une durée donnée :

$$\text{énergie émise par rayonnement} = \text{énergie reçue du Soleil par rayonnement}$$

Ce qui en termes de puissance moyenne donnerait :

$$\text{puissance émise par rayonnement} = \text{puissance reçue du Soleil}$$

Nous cherchons dans la suite à quantifier ces échanges.

Puissance émise par rayonnement

En considérant la Terre comme un corps noir de température moyenne $15^\circ C$, la puissance surfacique qu'émet sa surface est de $3,9 \cdot 10^2 W \cdot m^{-2}$ d'après la loi de Stefan. Mais considérant l'effet de serre et l'absorption d'une partie de ce rayonnement par l'atmosphère :

$$\text{puissance émise} = 2,4 \cdot 10^2 W \cdot m^{-2}$$

Puissance reçue du Soleil par rayonnement

Par une analyse spectrale de la lumière solaire en dehors de l'atmosphère terrestre, on détermine que le maximum d'émission du Soleil est d'environ $\lambda_m \simeq 5,0 \cdot 10^2 nm$, donc on peut évaluer sa température de surface à environ $5,8 \cdot 10^3 K$ d'après la loi de Wien. La surface du Soleil est d'environ $4\pi R_S^2 = 6,1 \cdot 10^{18} m^2$, donc la puissance totale qu'il émet est de l'ordre de $P_{Soleil} \simeq 3,9 \cdot 10^{26} W$ d'après la loi de Stefan.

La figure 2 montre que seule une fraction de cette puissance parvient jusqu'à la Terre : à la distance d du Soleil, la puissance totale émise par le Soleil se répartit uniformément sur la surface de la sphère de rayon d , soit donc $4\pi d^2$. La surface $\approx \pi R_T^2$ correspond à ce qui arrive au niveau de la Terre, soit donc :

$$P_{re\cscue/Terre} = \frac{\pi R_T^2}{4\pi d^2} P_{soleil}$$

Si on se ramène à l'unité de surface terrestre, la puissance reçue par unité de surface terrestre est :

$$P_{re\cscue/Terre,surfacique} = \frac{P_{re\cscue/Terre}}{4\pi R_T^2} = \frac{P_{soleil}}{16\pi d^2} \approx 3,5 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

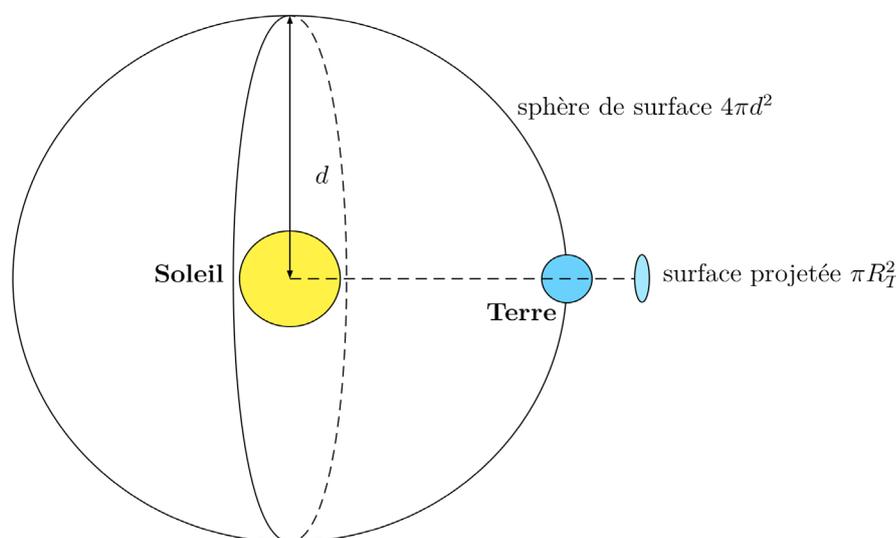


Figure 2 – Fraction de la puissance solaire interceptée par la Terre (proportions non respectées)

Seule une partie de cette puissance est effectivement reçue par la surface terrestre : en effet, une partie du rayonnement est réfléchi par la Terre. Ce qui permet de quantifier ce phénomène est l'**albédo** : c'est le taux de puissance solaire réfléchi par la Terre (0,3 en moyenne). Finalement :

$$\text{puissance reçue du Soleil} = P_{re\cscue/Terre,surfacique} \cdot (1 - \text{albédo}) \approx 2,4 \cdot 10^2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Conclusion

On retrouve bien numériquement le bilan d'énergie de la Terre :

$$\text{puissance émise par rayonnement} = \text{puissance reçue du Soleil}$$

Équilibre dynamique du Soleil

Le Soleil émet une puissance importante par rayonnement, mais contrairement à la Terre, elle n'est pas compensée par ce qu'il reçoit de la part des autres astres (puissance négligeable). L'émission de rayonnement s'accompagne d'une diminution de son énergie (énergie de masse) mais sa température reste globalement constante (équilibre dynamique) :

$$\frac{\text{variation d'énergie}}{\Delta t} = -P_{\text{Soleil}} \simeq -3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

Chaque seconde, le Soleil perd donc une énergie de masse de $3,9 \cdot 10^{26} \text{ J}$, ce qui correspond d'après la loi d'équivalence masse-énergie à une perte de masse de $m = \frac{E}{c^2} = 4,3 \cdot 10^9 \text{ kg}$ chaque seconde.

Équilibre dynamique du corps humain

Le corps humain est maintenu à une température constante, alors même qu'il cède d'avantage d'énergie à son environnement qu'il n'en reçoit (en dehors de tout apport d'énergie chimique lors des repas). De nombreux flux d'énergie sont à prendre en compte pour le bilan (représentés en figure 3) :

- puissance reçue par l'absorption des rayonnements électromagnétiques extérieurs (environnement proche et éventuellement rayonnement solaire) ;
- puissance perdue par rayonnement électromagnétique ;
- puissance perdue par diffusion de chaleur au contact du milieu extérieur (sauf dans un environnement très chaud où le sens de ces échanges est inversé) ;
- puissance perdue lors de l'évaporation par transpiration (chaleur latente).

Rayonnement environnement
proche

Rayonnement solaire direct
éventuel



Rayonnement

Diffusion
thermique (et
convection)

Transpiration

Figure 3 - Échanges entre l'organisme et l'environnement

L'énergie du corps humain décroît donc globalement au cours du temps. Un ordre de grandeur de la puissance perdue par le corps humain est la centaine de watt. Cela montre que la différence entre la puissance émise et la puissance reçue est de l'ordre de la centaine de watt. L'énergie du corps humain décroît ainsi de l'ordre de la centaine de joule chaque seconde soit $2 \cdot 10^3 \text{ kcal}$ par jour (énergie apportée par l'alimentation). Sa température, en revanche reste bien constante. Chez un individu en bonne santé et dont la corpulence est stable, toute la ration alimentaire quotidienne fournit donc une puissance moyenne d'environ 100 W.

Repères historiques

1879 : loi de Stefan, par Joseph Stefan, par l'expérience.

1900 : loi de Planck, par Max Planck, qui initie la théorie quantique, et permet la démonstration de la loi de Stefan et de Wien.

Retrouvez éduscol sur

