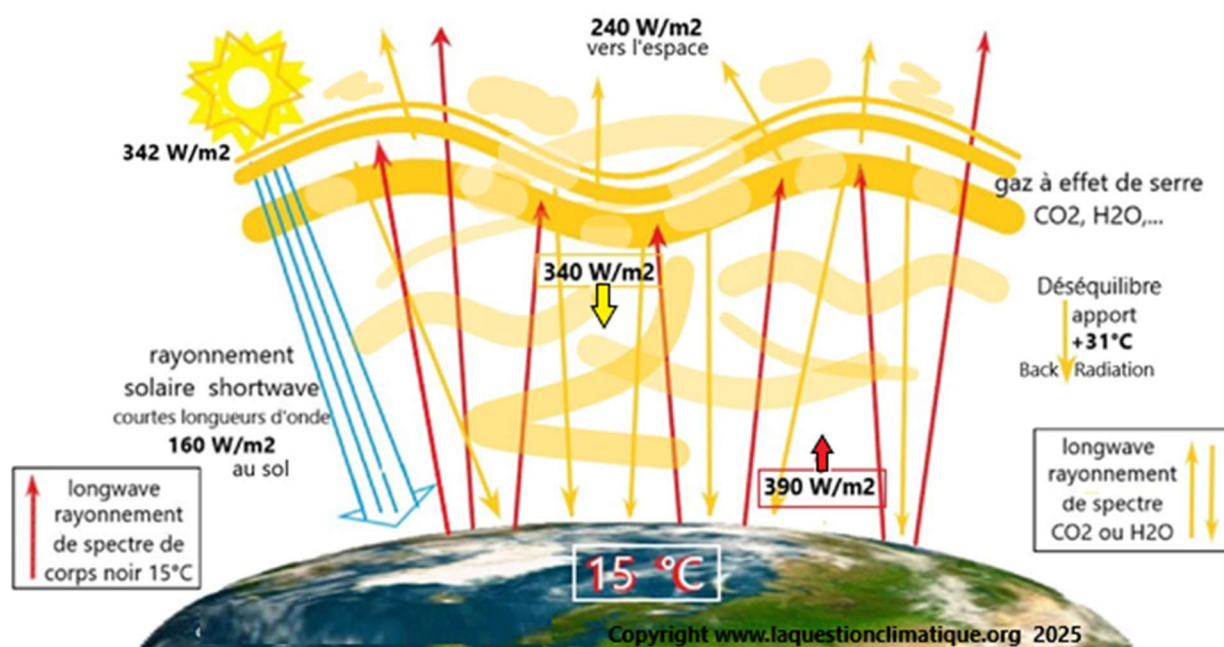




www.laquestionclimatique.org

Phénomènes atmosphériques détaillés

Par la rédaction, janvier 2025 – juin 2026, v 06.04



Phénomènes radiatifs

Phénomène de back radiation ou radiation en retour

Les échanges d'énergie de la Terre avec l'espace sont exclusivement radiatifs.

Chaque photon a une énergie qui est donnée par la relation de Planck : $E = h \times \nu$

E l'énergie du photon, en Joule (J) (rappel : 1W = 1 J/s 1W/m² = 1 J/s/m²)

h la constante de Planck, avec $h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ J.s

ν la fréquence de la radiation considérée (fréquence du photon), en Hertz (Hz ou s⁻¹)

égale la vitesse de la lumière divisée par la longueur d'onde de la radiation (15 µm => 20 Hz)

(Le « nombre d'onde » est l'inverse de la longueur d'onde : 15 µm => 667 cm⁻¹)

En climatologie, la **downwelling longwave radiation** - DLR (ou **back radiation**) désigne le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère vers la surface terrestre. Ce phénomène est une composante essentielle de l'effet de serre et joue un rôle crucial dans le bilan énergétique de la Terre.

Origine de la back radiation ou « radiation en retour » :

Rayonnement thermique de la surface terrestre : La surface terrestre absorbe l'énergie solaire $< 4\mu\text{m}$ et émet un rayonnement infrarouge long (longueur d'onde de l'ordre de 4 à 100 micromètres).

Absorption par les gaz à effet de serre : Une grande partie de ce rayonnement infrarouge (IR) est absorbée par interaction avec les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, comme la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'ozone (O_3). L'absorption des IR se fait par des transitions quantiques vibratoires et rotationnelles dans les molécules.

Réémission vers le sol : Ces gaz réémettent de l'énergie infrarouge dans toutes les directions, selon leur propre spectre, y compris vers la surface terrestre.

Le flux descendant est la **downwelling radiation** ou **back radiation**.

Elle contribue à maintenir une température relativement stable à la surface de la Terre en empêchant une grande partie de l'énergie thermique de s'échapper directement et immédiatement vers l'espace. Sans ce phénomène, la Terre serait beaucoup plus froide, avec

une température moyenne globale d'environ -18°C au lieu des $+15^\circ\text{C}$ observés actuellement. Les gaz à effet de serre constituent ainsi une sorte de piège temporaire d'une partie de l'énergie infrarouge, analogue à un miroir partiel.

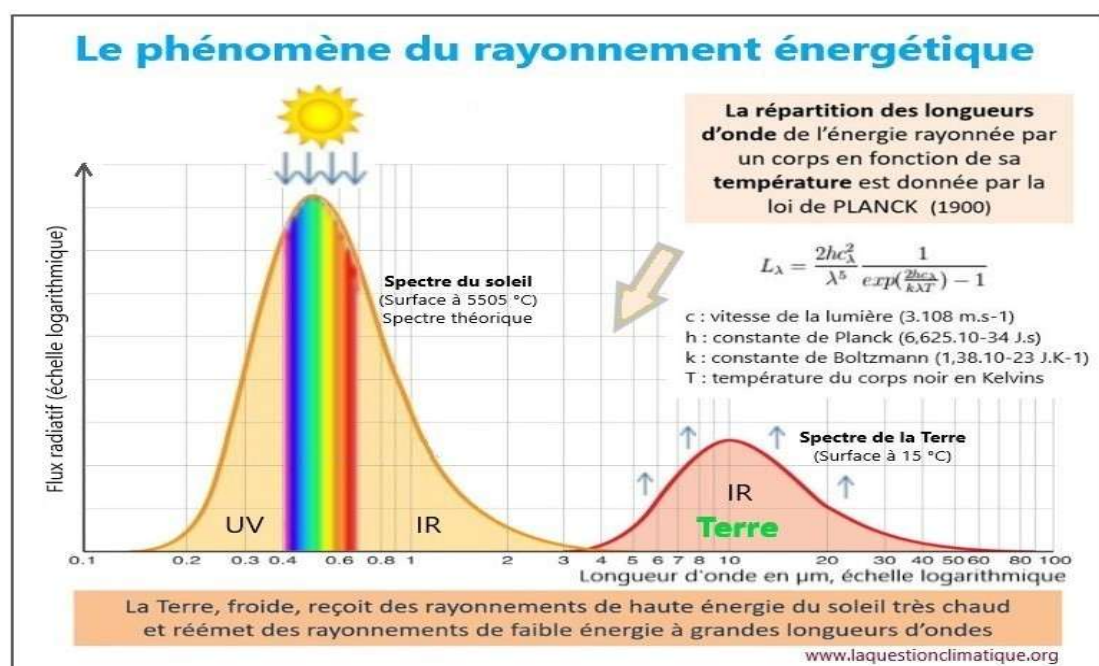


La **back radiation** est mesurée avec des instruments comme les pyrgéomètres qui mesurent jour et nuit le rayonnement infrarouge descendant de 4 à $40\mu\text{m}$, indépendamment du rayonnement solaire, dans une vingtaine de stations à travers le monde, comme au SIRTa à l'Ecole Polytechnique (Palaiseau).

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre amplifie ce rayonnement descendant, contribuant ainsi au réchauffement climatique qui favorise la vie sur terre.

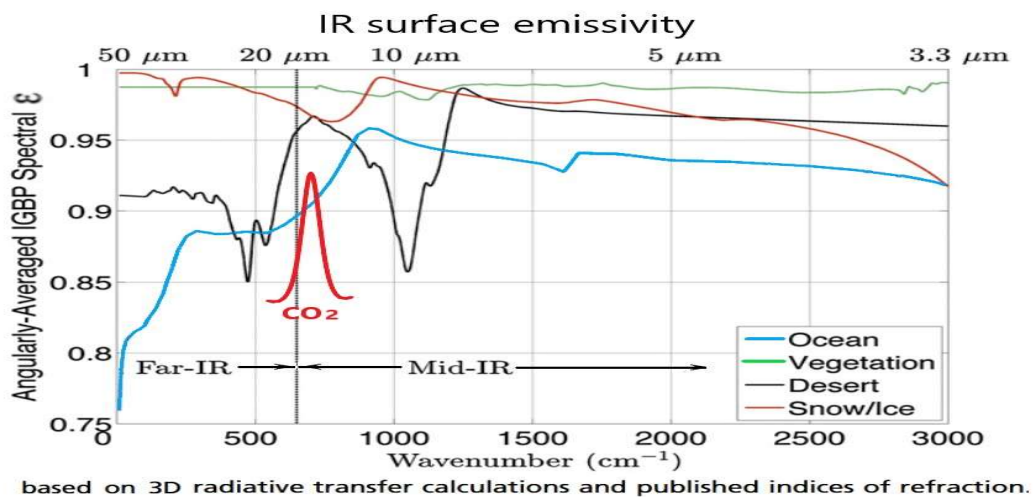
En résumé, la **downwelling longwave radiation** est un processus fondamental dans le système climatique terrestre, illustrant comment l'atmosphère agit comme une « couverture » qui renvoie de l'énergie vers la surface.

Spectre du corps noir, loi de Planck



Tous les raisonnements généralement appliqués en climatologie supposent que la Terre émet vers 15°C en moyenne suivant un spectre de corps noir conforme à la loi de Planck, avec une émissivité d'une valeur proche de 1. Ceci est très approximatif car le spectre infrarouge de l'eau liquide qui constitue 70 % de la surface (océans) est assez éloigné de la courbe de Planck. Le spectre d'émission de la surface est irrégulier et est celui d'un corps gris et l'émissivité réelle moyenne de la Terre dans la gamme utile de longueurs d'ondes est plus proche de 0,95-0,96.

Au-dessus des océans l'émissivité est plus faible de presque 10% que le corps noir théorique vers le nombre d'onde 670 cm^{-1} et le CO_2 dont c'est le pic principal capture plus aisément la radiation terrestre.



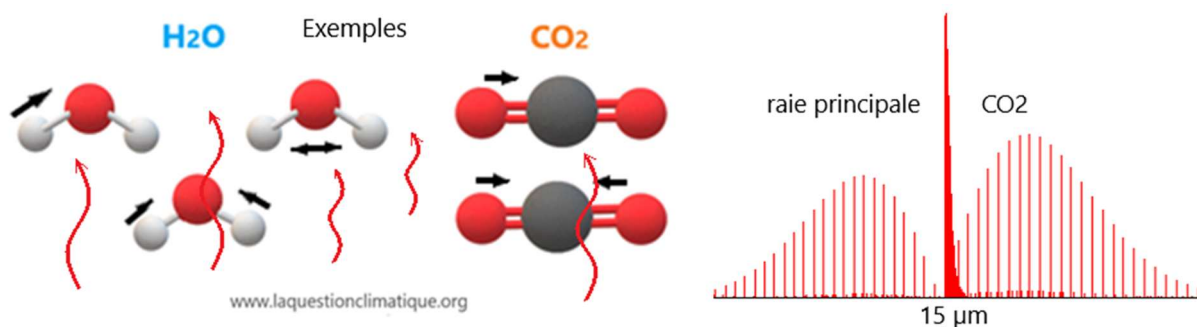
D'après Feldman et al. 2014 <https://doi.org/10.1073/pnas.1413640111>

Phénomènes moléculaires ou spectroscopiques à l'œuvre

Les phénomènes moléculaires et spectroscopiques responsables de la **downwelling radiation** sont bien compris et sont principalement liés à l'**interaction des molécules de gaz à effet de serre avec le rayonnement infrarouge**. Les principaux mécanismes impliqués d'absorption, émission spontanée ou émission induite ont fait l'objet d'une caractérisation de leurs coefficients de probabilité d'évènement (coefficients d'Einstein). Dans les conditions atmosphériques, l'émission spontanée isotrope domine.

1. Absorption et émission du rayonnement infrarouge :

Les molécules des gaz à effet de serre (comme CO_2 , H_2O , CH_4 , et O_3) possèdent des **modes vibrationnels et rotationnels** qui peuvent interagir avec le rayonnement infrarouge.



CO_2 : 6 degrés de liberté ; 4 vibrationnels, 2 rotationnels

H_2O : 6 degrés de liberté ; 3 vibrationnels, 3 rotationnels

Lorsqu'une molécule absorbe un photon d'une longueur d'onde elle passe à un état énergétique excité. Elle peut ensuite :

- **Relâcher cette énergie sous forme de rayonnement infrarouge** en émettant un photon dans toutes les directions (ce qui contribue à la back radiation).
- Convertir l'énergie absorbée en accroissement cinétique par collisions.

2. Modes vibrationnels pertinents :

Les modes vibrationnels activés dépendent de la structure moléculaire et des longueurs d'onde correspondantes :

- **Dioxyde de carbone (CO₂) :**
 - Modes asymétriques d'étirement et de flexion, notamment ω_1 à **15 micromètres** (dans l'infrarouge thermique). C'est cette raie centrale 15 μm seule qui est vite saturée.
- **Vapeur d'eau (H₂O) :**
 - Multiples bandes d'absorption dans l'infrarouge (4–7 micromètres, 12–30 micromètres, etc.), couvrant une large gamme spectrale.
- **Méthane (CH₄) :**
 - Fortes bandes autour de **7,7 micromètres**.
- **Ozone (O₃) :**
 - Bande d'absorption significative autour de **9,6 micromètres**.

Ces bandes d'absorption sont mesurées et caractérisées par des spectres d'absorption spécifiques.

3. Spectroscopie :

Les phénomènes en jeu sont décrits par les principes de la spectroscopie moléculaire :

- **Spectroscopie d'absorption infrarouge :**
 - Étudie les transitions énergétiques des molécules lorsqu'elles absorbent de l'infrarouge.
- **Élargissement des raies spectrales :**
 - Les raies d'absorption sont élargies par des effets comme :
l'**élargissement Doppler** (mouvement thermique des molécules) et
l'**élargissement collisionnel** (interactions entre molécules).
◦ Cela permet à un gaz d'absorber sur une gamme plus large de longueurs d'onde, notamment près de la surface plus dense et plus chaude.

La **résonance de Fermi** qui donne lieu à un élargissement considérable du spectre d'absorption du CO₂ en raison des nouvelles transitions émanant de niveaux vibrationnels excités. Élargissement de 5 THz (élargie de 13 à 17 μm). La combinaison entre rotation de la molécule et résonance de Fermi donne ainsi lieu à un impact très important du CO₂ sur le climat.

4. Fenêtres atmosphériques et saturation spectrale :

- Certaines régions spectrales de H₂O et CO₂ sont partiellement transparentes à l'infrarouge, appelées **fenêtres atmosphériques** (par exemple, autour de 8-12 micromètres). Ces fenêtres permettent à une partie du rayonnement terrestre de s'échapper directement vers l'espace.
- Toutefois, lorsque les concentrations de gaz augmentent, des bandes d'absorption supplémentaires deviennent actives ou s'élargissent, réduisant l'efficacité des fenêtres.

5. Rôle des transitions quantiques :

Les interactions avec le rayonnement infrarouge sont régies par les règles de sélection quantique, qui déterminent quelles transitions vibrationnelles ou rotationnelles sont permises.

Ces transitions dépendent :

- De la symétrie moléculaire.
- De la polarité de la molécule (les molécules polaires comme H₂O sont plus efficaces pour absorber et émettre dans l'infrarouge).

Conclusion :

Les phénomènes intervenant dans l'atmosphère sont très diversifiés et d'une grande complexité : absorptions, émissions, déviations, conversions des spectres. Les phénomènes moléculaires et spectroscopiques responsables de la **downwelling radiation** incluent principalement l'**absorption et l'émission infrarouge** isotrope par les gaz à effet de serre via leurs modes vibrationnels et rotationnels. Ces interactions sont étudiées grâce à la spectroscopie infrarouge, qui a permis de caractériser précisément les bandes d'absorption et les contributions des différents gaz. Cela constitue le fondement scientifique de la compréhension de l'effet de serre et de son rôle dans le système climatique.

La back radiation près de la surface domine les phénomènes de collisions moléculaires

La **back radiation** (rayonnement infrarouge descendant) près de la surface terrestre domine les phénomènes de collisions moléculaires en raison des processus physiques et des échelles énergétiques différentes impliquées. Ceci, bien que les émissions spontanées d'infrarouges soient bien moins fréquentes que les collisions moléculaires dues à l'agitation thermique. Voici pourquoi :

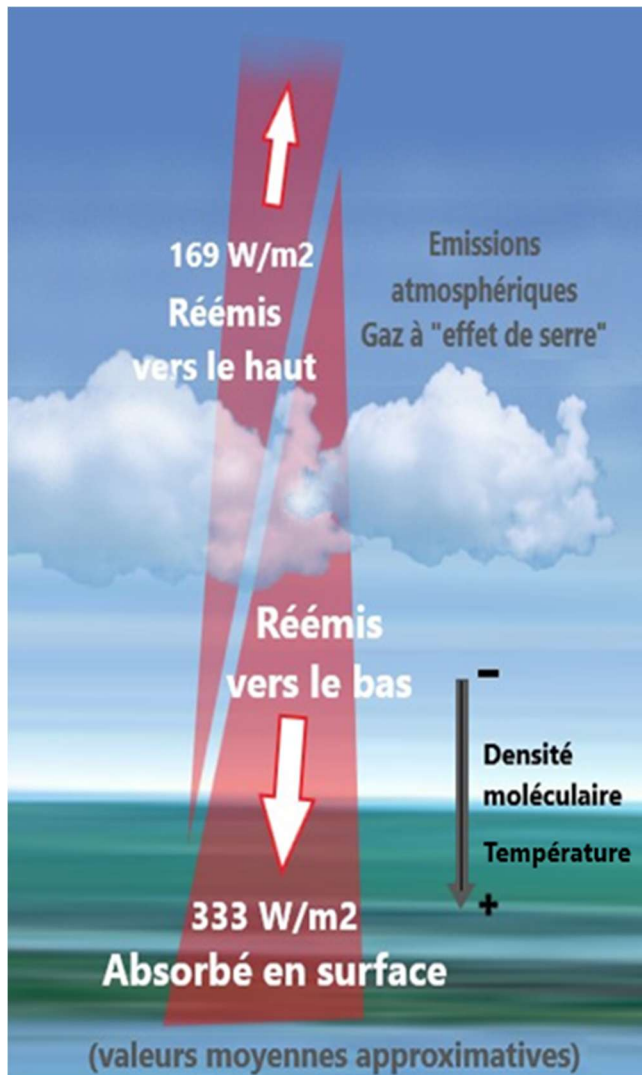
1. Rayonnement thermique et densité énergétique :

Le rayonnement thermique (back radiation) près de la surface terrestre est intense parce que :

- **La température est plus élevée près de la surface** (environ 288 K en moyenne), ce qui entraîne une émission thermique accrue selon la loi de Stefan-Boltzmann $M = \sigma \epsilon T^4$ (irradiance M en W/m²).
- L'atmosphère émet un rayonnement infrarouge en relation avec sa température locale, et la densité énergétique de ce rayonnement est significative à ces altitudes.

En revanche, les **collisions moléculaires** très nombreuses peuvent changer les niveaux d'énergie des gaz à effet de serre GES ou dissipent de l'énergie cinétique dans le gaz environnant, incluant oxygène, azote, argon. Elles contribuent ainsi à entretenir une population statistique de GES capable d'émission infrarouge et « commande » ainsi le niveau d'émission spontanée isotrope.

2. Interaction des photons avec les gaz à effet de serre :



Le rayonnement infrarouge est émis par la surface et les gaz de l'atmosphère (il existe dans l'atmosphère d'autres sources d'énergie radiative : émissions des gaz réchauffés par les condensations de vapeur et les convections, émissions des nuages). Il interagit directement dans l'atmosphère avec les molécules de gaz à effet de serre (H_2O , CO_2 , CH_4 , etc.) via leurs modes vibrationnels. Ces molécules absorbent et réémettent des photons y compris vers la surface.

- À proximité de la surface, l'absorption et la réémission par ces gaz, dont l'émission induite est mineure, génèrent un flux descendant détectable comme la back radiation. Ce flux est plus important à proximité de la surface qu'en altitude du fait de la densité moléculaire et de la température qui sont plus élevées en surface. C'est pourquoi la réémission, malgré qu'elle soit isotrope (dans toutes les directions), est moindre vers l'espace.

- Les collisions moléculaires (y compris N_2 , O_2) redistribuent l'énergie entre les molécules. Elles ne sont pas source supplémentaire directe de rayonnement mais ces collisions peuvent exciter les molécules de CO_2 ou H_2O vers des états vibratoires ou rotationnels supérieurs.

3. Temps caractéristique des processus :

- Collisions moléculaires :
 - Les collisions entre molécules dans l'atmosphère se produisent extrêmement rapidement (de l'ordre de 10^{-12} secondes à des pressions atmosphériques typiques).
 - Ces collisions entraînent une redistribution de l'énergie cinétique, mais elles ne contribuent pas directement au flux radiatif net vers la surface.
- Émission radiative :
 - L'émission d'un photon après excitation vibrationnelle est un processus relativement beaucoup plus lent, mais son effet est directement mesurable sous forme de flux radiatif.

Près de la surface, où les densités de gaz sont plus élevées, les collisions sont plus fréquentes et peuvent rendre certaines molécules excitées thermiquement et changer leur état vibrationnel ou rotationnel et favoriser ainsi l'émission future d'un photon. L'émission radiative reste dominante dans le bilan énergétique.

4. Échelle d'altitude :

- **Près de la surface (quelques mètres à quelques centaines de mètres) :**
 - La densité de l'air est très élevée, augmentant la probabilité que les molécules excitées par collision soient "recyclées" pour participer à l'émission infrarouge.
 - Ce rayonnement est ensuite perçu comme back radiation.
- **À plus haute altitude :**
 - La densité de l'air diminue, les collisions moléculaires deviennent moins fréquentes, et les phénomènes radiatifs prennent une importance relative encore plus grande mais la back radiation vers la surface s'affaiblit.

5. Longueurs d'onde pertinentes :

Les longueurs d'onde caractéristiques de la back radiation (dans l'infrarouge, environ 4–60 micromètres) correspondent à celles réémises par les gaz à effet de serre.

Conclusion :

La **back radiation domine les phénomènes de collisions moléculaires près de la surface** parce que :

1. Le rayonnement thermique a une densité énergétique importante en raison des températures élevées et de l'absorption/émission ou réémission infrarouge par les gaz.
2. Les processus radiatifs, bien que plus lents individuellement, se manifestent directement comme un important flux mesurable d'irradiance en W/m². Le nombre de molécules en jeu étant énorme.
3. Les collisions moléculaires redistribuent l'énergie sans produire directement un flux radiatif à l'échelle macroscopique mais n'empêchent pas les processus radiatifs de se produire.

C'est cette réémission radiative par les gaz à effet de serre, notable près de la surface du fait des hautes températures et densités moléculaires, qui explique pourquoi la back radiation est prépondérante.

Une concentration plus élevée de gaz comme le CO₂ ou la vapeur d'eau plus présente près de la surface augmentera l'intensité de ce flux. Les couches atmosphériques plus chaudes émettent davantage d'énergie vers le bas. Les nuages augmentent considérablement le rayonnement descendant en raison de leur capacité à absorber et réémettre l'énergie infrarouge. Plus on est près de la surface, plus la densité des gaz augmente, et donc, plus le flux descendant est intense.

Influence de l'évaporation en surface

1. Influence de l'évaporation de surface sur le bilan énergétique :

L'évaporation transfère de l'énergie de la surface terrestre vers l'atmosphère sous forme de **chaleur latente de vaporisation**. Cette chaleur, absorbée par l'eau pour passer de l'état liquide à l'état gazeux agit comme un mécanisme de **refroidissement naturel** de la surface (sols, surface océanique).

Le cycle de l'eau dans l'atmosphère se traduit par une modification du gradient thermique adiabatique qui de -9,8°C par km pour de l'air sec passe à environ -6,5°C par km (valeur moyenne).

Quantité d'énergie mobilisée par l'évaporation :

- Environ **80 W/m²** du flux énergétique moyen global est utilisé pour l'évaporation, selon le bilan énergétique global terrestre.
- Cela représente une fraction importante de l'énergie totale reçue de l'irradiance solaire (environ 342 W/m² en moyenne à la haute atmosphère).

2. Impact en termes de température :

Pour estimer l'impact direct de l'évaporation sur la température globale, on peut considérer l'énergie évacuée par l'évaporation en termes d'équivalent thermique :

1. Quantité de chaleur évacuée par évaporation :

- L'énergie utilisée pour l'évaporation est de l'ordre de **80 W/m²**.
- Cette énergie équivaut à un refroidissement moyen global si elle n'était pas compensée par d'autres mécanismes.

2. Effet de refroidissement :

- La relation entre énergie et variation de température pour une surface terrestre moyenne peut être estimée en utilisant la formule :

$$\Delta T = E / C$$

- E est l'énergie évacuée par mètre carré (80 W/m²),
- C est la capacité thermique effective (dépendant des propriétés thermiques de l'air et de la surface).

Pour une estimation simplifiée, cette dissipation de chaleur latente pourrait correspondre à une réduction de température de **2 à 4 °C** de la surface terrestre, selon les conditions locales et la capacité thermique moyenne.

3. Facteurs modulant cet effet :

L'influence exacte de l'évaporation varie en fonction de plusieurs facteurs :

- **Disponibilité d'eau** : L'évaporation est plus intense au-dessus des océans, où l'eau est abondante, qu'au-dessus des terres, où l'humidité peut être limitée (déserts).
- **Température locale** : Une température plus élevée favorise une évaporation plus importante, renforçant l'effet de refroidissement.
- **Ventilation atmosphérique** : Des vents forts augmentent le taux d'évaporation en transportant rapidement la vapeur d'eau loin de la surface.
- **Cycle hydrologique global** : L'énergie transportée par la vapeur d'eau est ensuite relâchée dans l'atmosphère lors de la condensation, ce qui réchauffe les couches supérieures de l'atmosphère et peut influencer les dynamiques climatiques globales.

4. Comparaison avec d'autres flux énergétiques :

L'évaporation est une composante importante du bilan énergétique, mais elle ne peut pas être isolée des autres mécanismes (effet de serre, rayonnement net, conduction). Son influence est surtout interne dans le système fermé Terre. Toutefois, elle contribue de manière essentielle à :

1. **Limiter les excès de la température diurne** : En dissipant l'énergie excédentaire reçue par la surface sous forme de chaleur latente.
2. **Maintenir un climat global équilibré** : En transférant cette énergie vers l'atmosphère où elle est redistribuée.

Conclusion : L'évaporation de surface contribue à réduire la température moyenne globale de surface de **2 à 4 °C**, selon les estimations basées sur le flux énergétique mobilisé pour ce processus. Ce mécanisme agit en synergie avec d'autres processus comme le rayonnement et les échanges convectifs (mouvements d'air en surface, vents) pour réguler la température terrestre et maintenir un climat global stable au niveau de la basse troposphère (par convention à 2 m d'altitude). Il faut noter néanmoins que l'évaporation refroidit directement la surface (sol continental humide, surface des eaux) mais pas directement l'air ambiant qui transporte par convections la chaleur latente (enthalpie de vaporisation) vers les couches d'altitude plus élevée qui seront réchauffée par condensation.

En moyenne globale la « surface » est environ 2°C plus chaude que la couche atmosphérique basse (2 m). Le gradient thermique adiabatique atmosphérique redistribue les températures en fonction de l'altitude.

Copyright www.laquestionclimatique.org 2025-2026