

Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Rayonnement thermique

JR Seigne MP*, Clemenceau
Nantes

December 8, 2024

1 Ondes électromagnétiques

Rayonnement dipolaire
Vecteur de Poynting

2 Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de spectres

3 Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

4 Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et développement
Vision nocturne
La Terre

Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

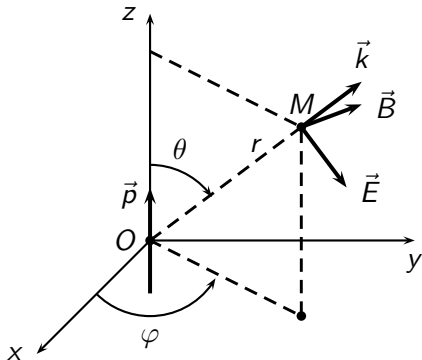
Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Le rayonnement thermique est un transfert énergétique faisant intervenir à la fois l'émission et l'absorption d'ondes électromagnétiques.



Application en vision nocturne

Onde rayonnée



Moment dipolaire oscillant : $\vec{p} = qa \exp i\omega t \vec{e}_z$.

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega^2}{4\pi r c} \sin \theta \exp i(\omega t - kr) \vec{e}_\varphi$$

$$\vec{E} = -\frac{\mu_0 p_0 \omega^2}{4\pi r} \sin \theta \exp i(\omega t - kr) \vec{e}_\theta$$

\vec{E} est en $V \cdot m^{-1}$. Par la formule $\frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi r}$, on voit que \vec{B} est en $A \cdot m^{-1}$.

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu_0} \text{ est en } V \cdot A \cdot m^{-2} \text{ ou } W \cdot m^{-2}$$

Le vecteur de Poynting correspond donc à une puissance surfacique ou *flux surfacique* :

$$\text{Puissance surfacique : } j_{ray} = \varphi = \Pi$$

Flux surfacique du dipôle oscillant :

$$\vec{J}_{ray} = \frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{16\pi^2 cr^2} \sin^2 \theta \cos^2(\omega t - kr) \vec{e}_r$$

Caractéristiques :

- Il n'est pas isotrope : dépendance en $\sin^2 \theta$.
- Il évolue en $\frac{1}{r^2}$.
- Il se propage à la vitesse $c = \frac{\omega}{k}$.
- Il est monochromatique de longueur d'onde $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$.

Puissance rayonnée :

$$P_{ray} = \oiint \vec{J}_{ray} \cdot d\vec{S}$$

Modèle du corps noir

Planck proposa en 1900 le modèle du *corps noir* :

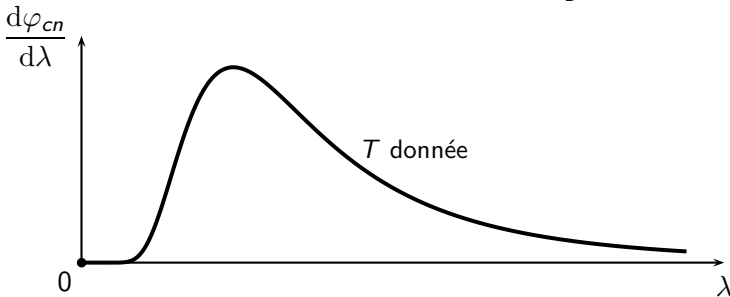
- Le système est modélisé par une multitude de dipôles oscillants (Thermodynamique statistique).
- Il est à l'équilibre thermodynamique.
- Il reçoit autant d'énergie qu'il n'en émet.
- Il absorbe la totalité de l'énergie qu'il reçoit (*noir* pour le visible).

$$\text{Corps noir} \Leftrightarrow \text{Équilibre} \Leftrightarrow \varphi_{\text{incident}} = \varphi_{\text{absorbé}} = \varphi_{\text{émis}}$$

Forme de la loi de Planck

La Thermodynamique statistique conduit à :

$$\frac{dj_{ray}}{d\lambda} = \frac{d\varphi_{\text{corps noir}}}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1}$$



Le rayonnement n'est pas monochromatique.

Maximum d'émission

$$\text{Avec } \alpha = \frac{hc}{k_B T \lambda}, \text{ on a : } \frac{d\varphi_{\text{Corps Noir}}}{d\lambda} = \frac{2\pi k_B^5 T^5}{h^4 c^3} f(\alpha)$$

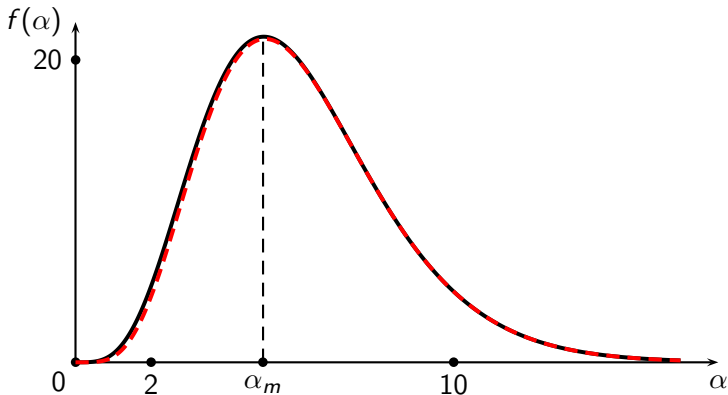
$$\text{où } f(\alpha) = \frac{\alpha^5}{\exp \alpha - 1}.$$

Le maximum d'émission, à T fixée, est obtenu pour :

$$\alpha_m = \frac{hc}{k_B T \lambda_m} = 4,9651$$

Maximum d'émission

$$f(\alpha) = \frac{\alpha^5}{\exp \alpha - 1} \text{ en noir, } f(\alpha) \simeq \alpha^5 \exp -\alpha \text{ en rouge}$$



$$\text{Maximum pour } \alpha_m = \frac{hc}{k_B T \lambda_m} = 4,9651 \text{ ou pour } \alpha_m \simeq 5.$$

Loi de Wien

On a donc $\lambda_m T = \frac{hc}{4,9651k_B}$. Cela conduit à l'énoncé de la loi de Wien :

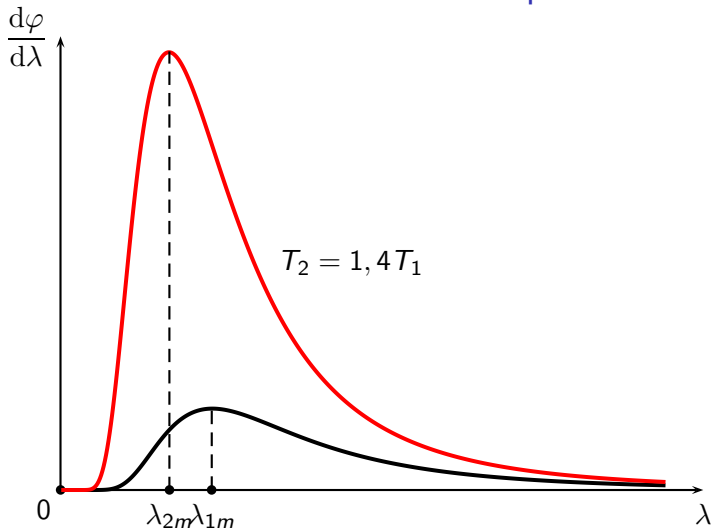
$$\text{Loi de Wien : } \lambda_m T = 2895 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Souvent approximée par : $\lambda_m T \simeq 3000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

Maximum solaire : $\lambda_m \simeq 0,5 \mu\text{m}$ d'où $T \simeq 6000 \text{K}$ dans le visible.

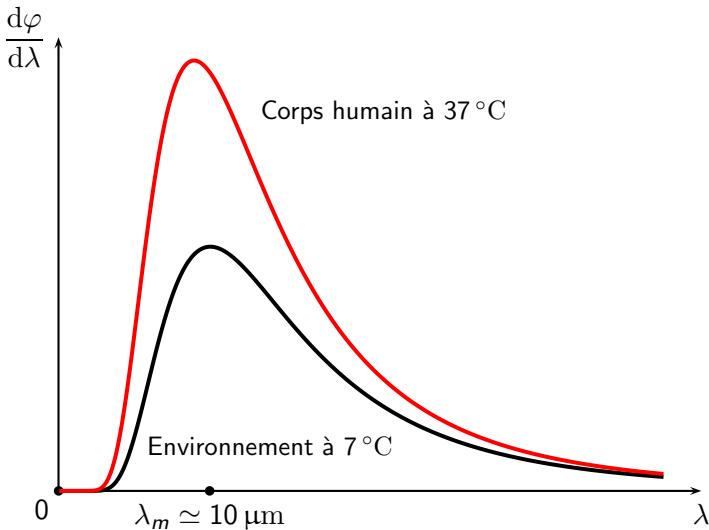
Maximum terrestre : $T \simeq 300 \text{K}$ d'où $\lambda_m \simeq 10 \mu\text{m}$ dans l'infrarouge.

Influence de la température



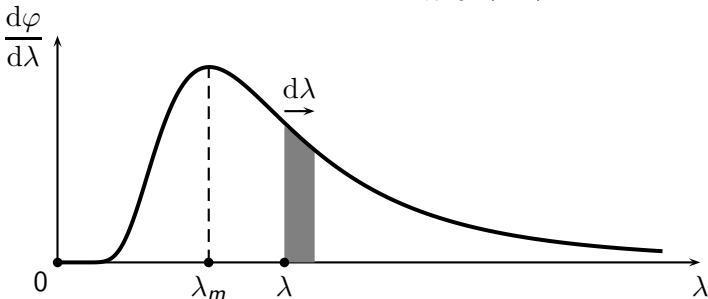
Plus T est élevée, plus le maximum est marqué et plus il est décalé vers les courtes longueurs d'onde.

Vision nocturne



Loi de Stefan

Flux surfacique total : $j_{ray} = \varphi = \int_{\lambda=0}^{\infty} \left(\frac{d\varphi}{d\lambda} \right) d\lambda.$

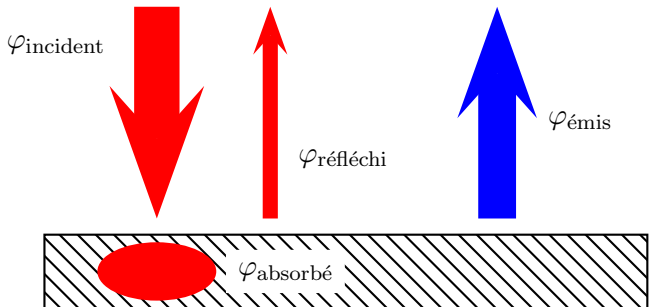


Loi de Stefan-Boltzmann : $j_{ray} = \sigma T^4$

Corps gris

$$\text{Loi du corps gris : } j_{\text{ray}} = \varepsilon \sigma T^4$$

	ε Visible $\lambda \simeq 0,5 \mu\text{m}$	ε Infrarouge $\lambda \simeq 10 \mu\text{m}$
acier galvanisé	0,89	0,28
marbre blanc	0,47	0,97
verre	0,10	0,90
papier blanc	0,28	0,95
végétation	0,80	0,85



- Flux incident : $\varphi_{incident} = \varphi_{réfléchi} + \varphi_{absorbé}$
- Flux réfléchi : $\varphi_{réfléchi} = A\varphi_{incident}$
- Flux absorbé : $\varphi_{absorbé} = (1 - A)\varphi_{incident}$
- Flux partant : $\varphi_{partant} = \varphi_{réfléchi} + \varphi_{émis}$

Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

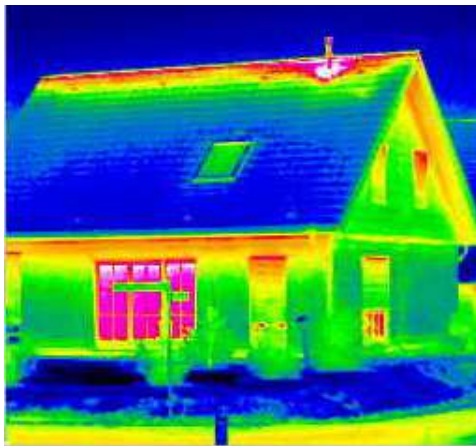
Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Isolation d'une maison



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

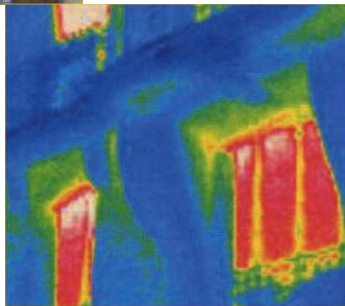
Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Immeuble 1900



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

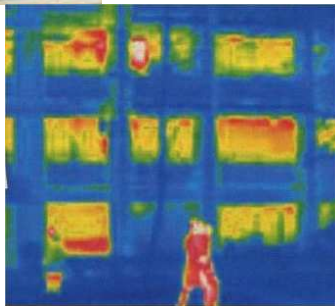
Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Immeuble 1979



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

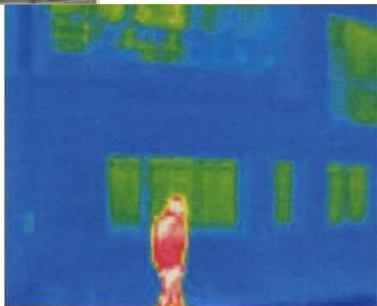
Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Immeuble 1995



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Repérage d'une connexion défective

Ondes électro-magnétiques

Rayonnement dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de spectres

Loi de Stefan

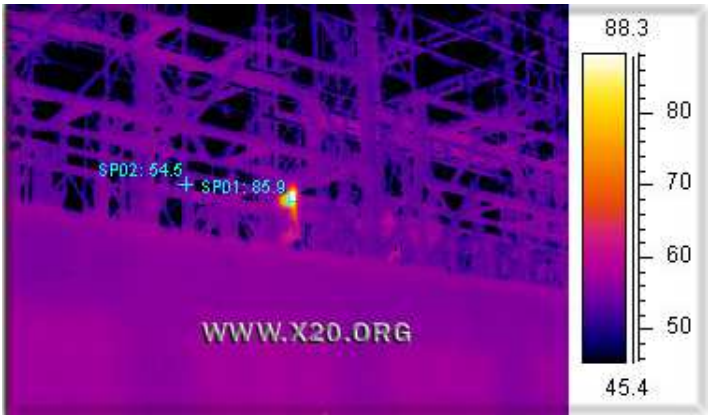
Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule

Observations médicales

Sécurité alimentaire
Recherche et développement
Vision nocturne
La Terre



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Effet Joule plus important

Ondes électro-magnétiques

Rayonnement dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

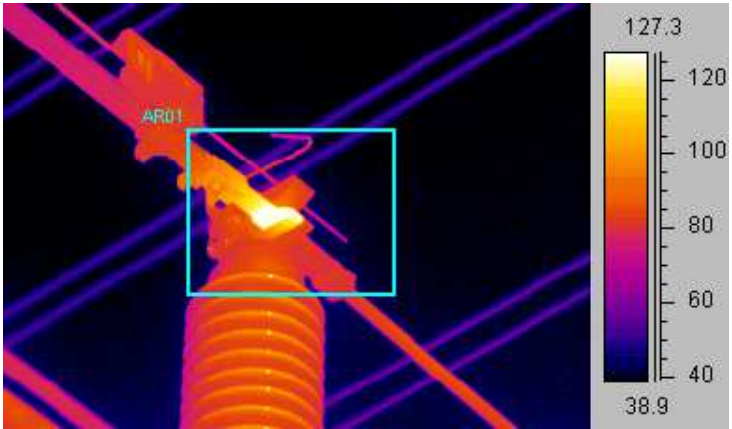
Applications

Fuites thermiques
Effet Joule

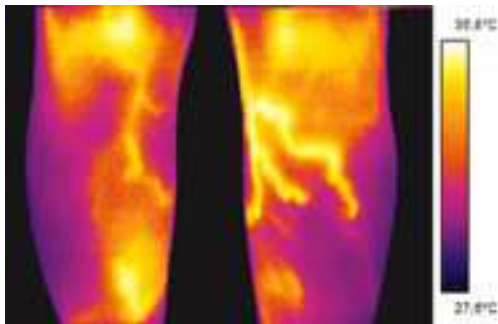
Observations médicales

Sécurité alimentaire
Recherche et développement

Vision nocturne
La Terre



Aide au diagnostic (1)



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule

Observations médicales

Sécurité alimentaire
Recherche et
développement
Vision nocturne
La Terre

Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électro-magnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule

Observations
médicales

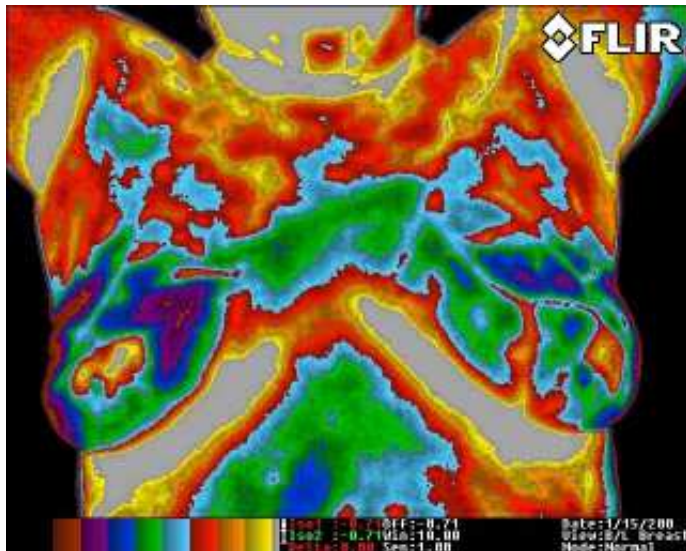
Sécurité alimentaire

Recherche et
développement

Vision nocturne

La Terre

Aide au diagnostic (2)



Sécurité alimentaire (1)

Comparaison des observations dans le visible et en infrarouge



Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électro-magnétiques

Rayonnement dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

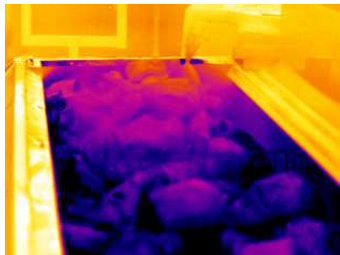
Fuites thermiques
Effet Joule
Observations médicales

Sécurité alimentaire

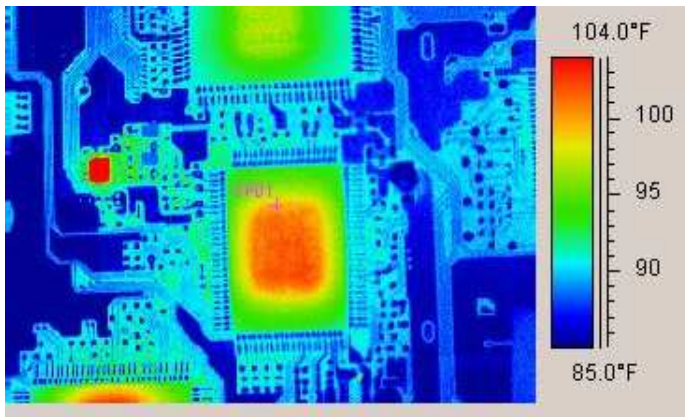
Recherche et développement
Vision nocturne
La Terre

Sécurité alimentaire (2)

Autre comparaison



Conception des circuits intégrés



Rayonnement
thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électro-
magnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire

Recherche et
développement

Vision nocturne

La Terre

Observations à distance



Rayonnement
thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électro-
magnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement

Vision nocturne

La Terre

Rayonnement thermique

JR Seigne
MP*,
Clemenceau
Nantes

Ondes électromagnétiques

Rayonnement
dipolaire
Vecteur de Poynting

Loi de Planck

Corps noir
Loi de Wien
Comparaison de
spectres

Loi de Stefan

Énoncé
Bilan de flux

Applications

Fuites thermiques
Effet Joule
Observations
médicales
Sécurité alimentaire
Recherche et
développement

Vision nocturne

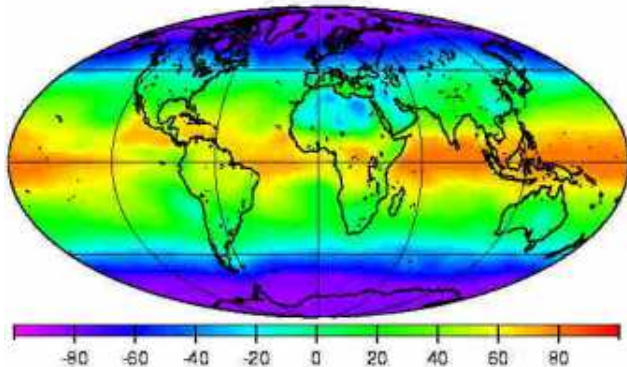
La Terre

Secours en mer



Bilan radiatif

Cette image montre la moyenne annuelle du bilan de flux radiatif terrestre en $W \cdot m^{-2}$.



Les courants marins et aériens transportent l'excédent d'énergie de l'équateur vers les pôles.