Unité de cours Energétique G1TGCBENE

Groupe

Valérie Leprince

PLEIAQ

Valerie.leprince@pleiaq.net

Planning

*:QCM
Test le vendredi 22 décembre 8h-10h

- Jeudi 12 octobre (10h30-12h30): Rayonnement: facteurs de forme, comportement des corps noirs, comportement des corps réels
- Jeudi 19 octobre (10h30-12h30): Rayonnement: échanges entre surfaces noires
- **Vendredi 20 octobre (13h30-15h30**): Rayonnement: échanges entre surfaces grises, méthode des radiosité (remplace le cours du 27/10 15h45-17h45)
- Jeudi 9 novembre (10h30-12h30)*: Convection: définitions, grandeurs, nombre sans dimension
- Jeudi 16 novembre(10h30-12h30): convection suite et fin
- Jeudi 23 novembre(10h30-12h30)*: conduction: définitions, grandeurs lois d'échange, géométrie plane
- Jeudi 30 novembre (10h30-12h30): conduction: problèmes couplés
- Jeudi 7 décembre(10h30-12h30)*: Transfert de masse: définitions, grandeurs, diagramme psychométrique, condensation superficielle
- Jeudi 14 décembre (10h30-12h30): Bilan hygrothermique de la paroi

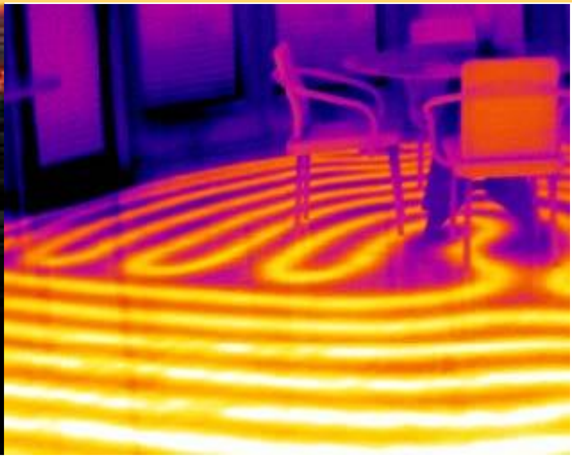
Objectifs du cours

- Connaître les principes physiques et lois fondamentales des trois principaux modes de transfert,
- Connaître les ordres de grandeurs des caractéristiques thermo-physiques des matériaux,
- Être capable de modéliser un problème faisant intervenir les trois principaux modes.

Contenu du cours

- Transfert de chaleur par rayonnement
- Transfert de chaleur par convection
- Transfert de chaleur par conduction
- Étude des phénomènes couplés
- Transfert d’humidité





Transfert de chaleur par rayonnement

Séance n°2

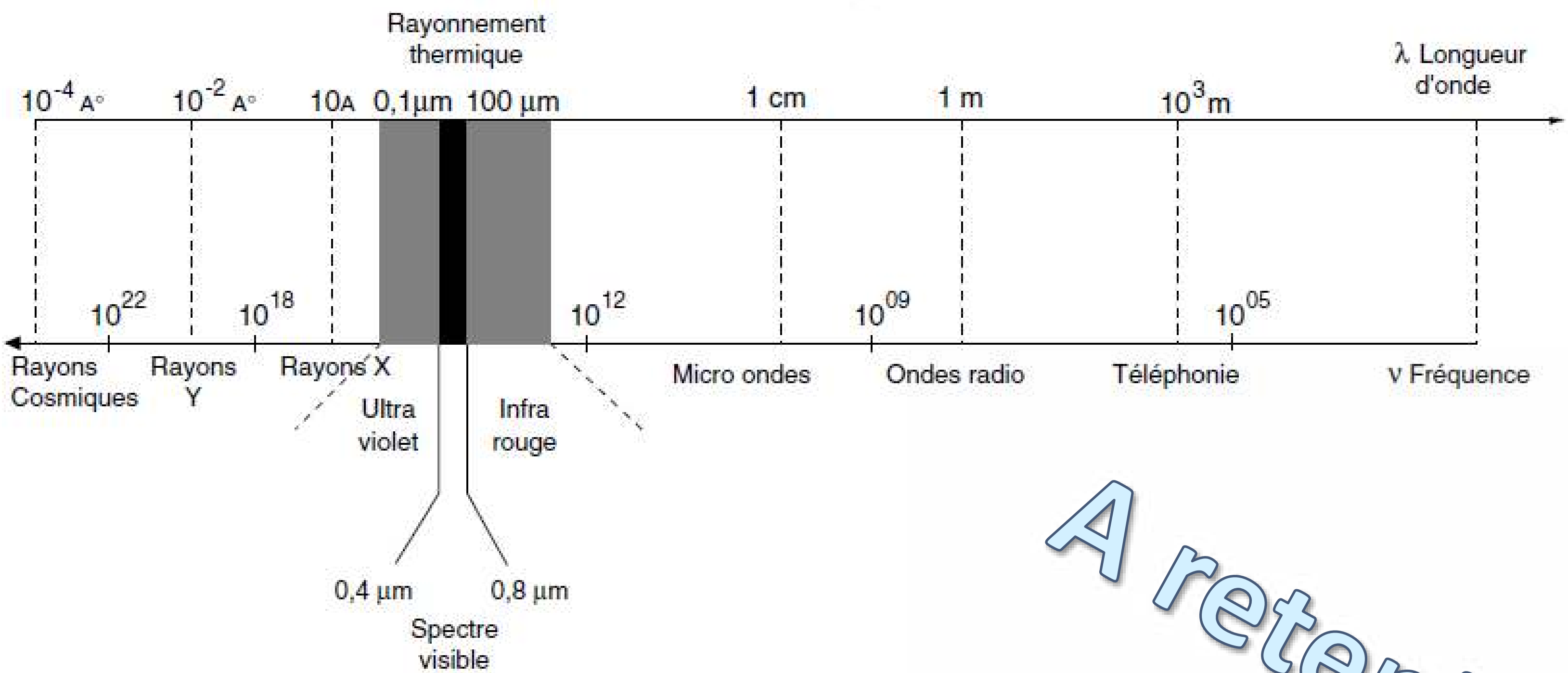
Grandeurs / Lois d’émission des corps noirs /

Plan de la séance n°2

- Rappel théorique
  - La définition des grandeurs utilisées en rayonnement
  - Les lois d'émission du corps noir
  - Les lois de comportement des corps réels

- Exercices d'application
  - Température d'équilibre du sol
  - Plaques planes parallèles
  - Lampe à incandescence

Rayonnement thermique



A retenir!

CLO (Courtes Longueurs d'Ondes) ≤ 2,5 µm (visible, ultraviolet…)
GLO (Grandes Longueurs d'Ondes) > 2,5 µm (infrarouge…)

Caractérisation spectrale et spatiale

- Composition spectrale:
  - **Grandeurs totales** relatives à l'ensemble du spectre.
  - **Grandeurs monochromatiques** relatives à un intervalle dλ autour d'une longueur d'onde λ.

- Distribution spatiale:
  - **Grandeurs hémisphériques** concernant l'ensemble de l'espace dans lequel un élément peut rayonner ou recevoir du rayonnement.
  - **Grandeurs directionnelles** caractérisant une direction donnée de propagation du rayonnement, relativement à la surface considérée.

Flux (énergétique)

- Puissance totale émise par un corps dans l'espace environnement *[W : Watt]*

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{\boldsymbol{dQ}}{\boldsymbol{dt}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\boldsymbol{\Delta Q}}{\boldsymbol{\Delta t}}$$

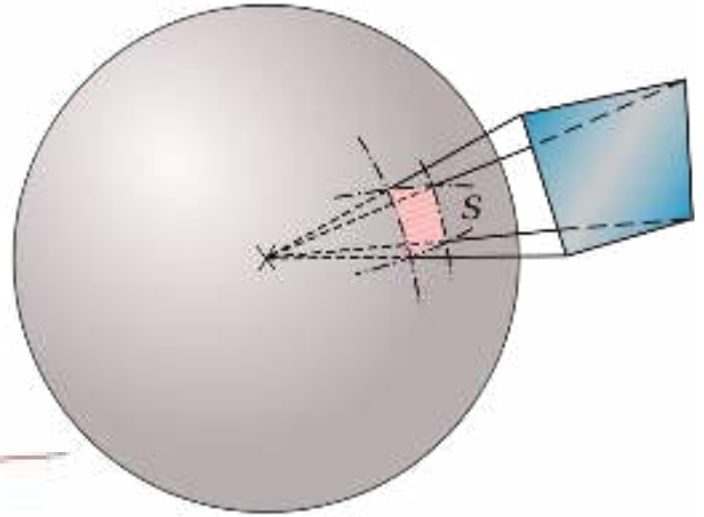
$$\boldsymbol{\Phi} = \int_0^\infty \boldsymbol{\Phi_\lambda d\lambda}$$

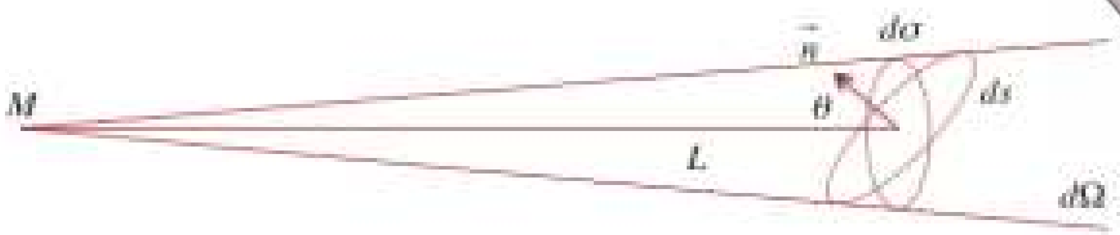
Angle solide

- C'est l'analogue tridimensionnel de l'angle plan (rapport de l'arc sur le rayon). L'angle solide est dans l'espace le rapport de la surface d'une partie d'une sphère sur le rayon au carré *[sr : stéradian]*.
- Il mesure la surface sur laquelle un objet se projette radialement sur une surface de rayon unité.

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2}$$



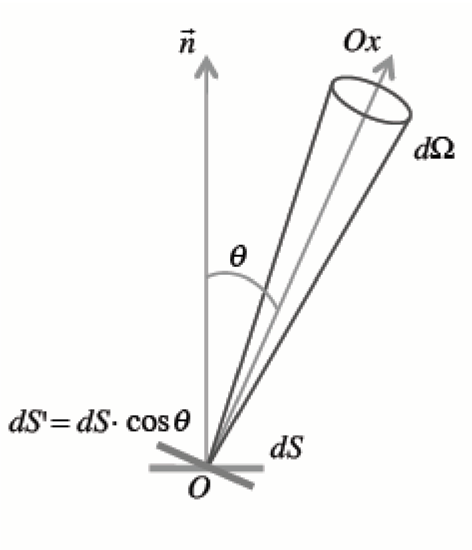


Luminance (énergétique)

- Flux émis par unité de surface de ce corps perpendiculaire à la direction d'émission et par unité d'angle solide *[W.m^{-2}. sr^{-1}]*

$$L_{Ox} = \frac{d^2\Phi_{Ox}}{d\Omega\, dS\, \cos\theta}$$

$$L_{Ox,\lambda} = \frac{d^2\Phi_{Ox,\lambda}}{d\Omega\, dS\, \cos\theta\, d\lambda}$$



Emittance (énergétique)

- Flux émis par unité de surface émettrice dans tout l'hémisphère qu'il peut voir, ramené à l'unité de surface émettrice *[W.m⁻²]*

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

$$M = \int_0^{\infty} M_\lambda d\lambda$$

Loi de Lambert

- Luminance indépendante de la direction d'émission:
  - **Rayonnement isotrope**: identique dans toutes les directions (indépendant de θ et ψ)

$$\boldsymbol{M = \pi L}$$

$$M_\lambda = \pi L_\lambda$$

  - **Rayonnement homogène**: indépendant de la longueur d'onde

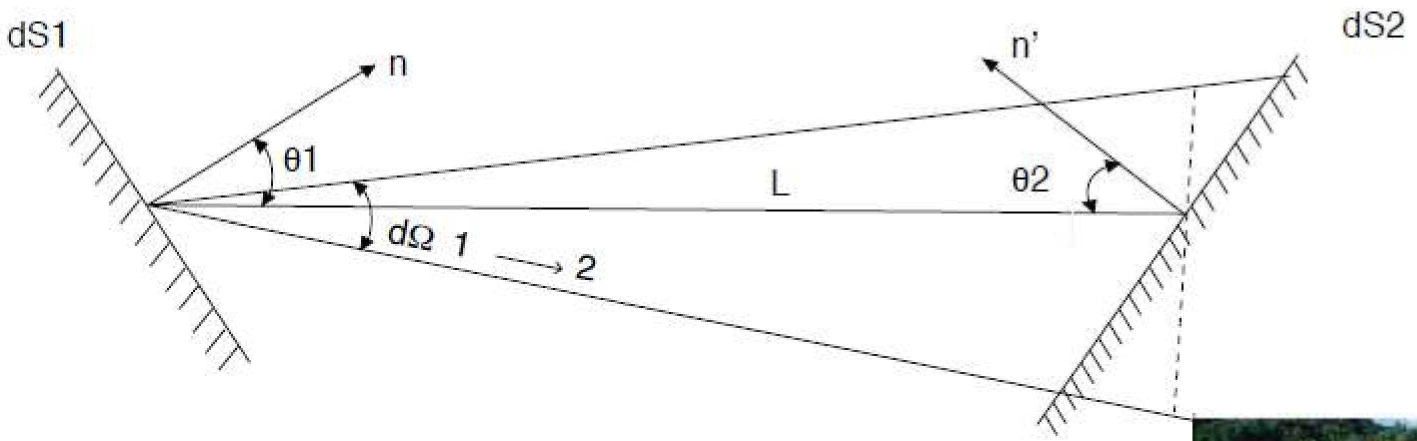
A retenir!

Eclairement

- Flux reçu par unité de surface réceptrice *[W.m⁻²]*

$$\boldsymbol{E = \frac{d\Phi}{dS}}$$

$$E = \frac{d^2\Phi_{dS_1 \to dS_2}}{dS_2} = \frac{L_{dS_1 \to dS_2} dS_1 \cos\theta_1 \cos\theta_2}{l^2}$$



Corps noir

- Radiateur idéal
- Flux émis maximum, à T et λ données
- Concept théorique utilisé comme référence : étalon de rayonnement

A retenir!

Corps noir:
- **Emissivité $\varepsilon = 1$**
- **Coefficient d'absorption $\alpha = 1 \Rightarrow \rho = \tau = 0$**
- **Rayonnement isotrope**

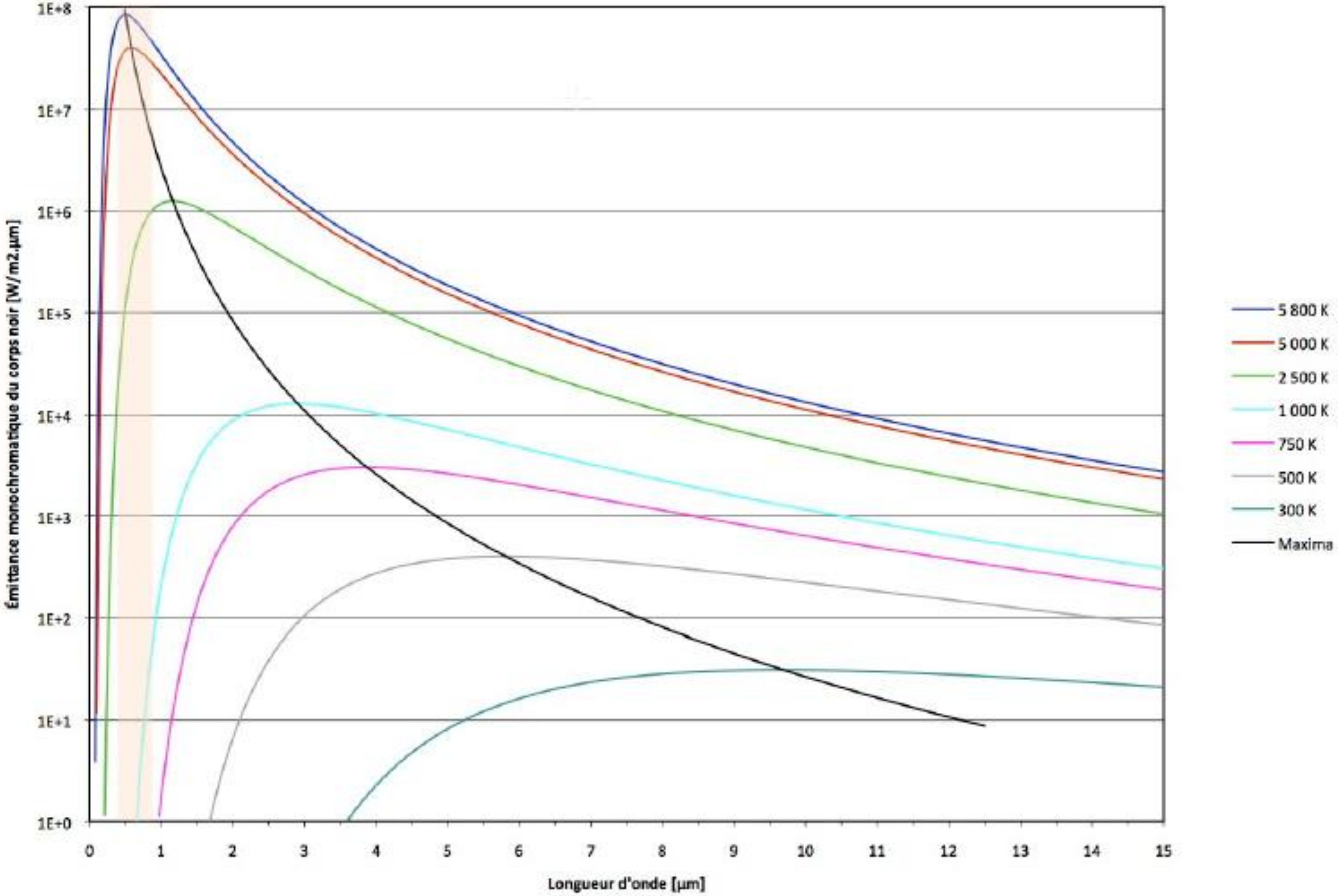
Loi de Planck

- Emittance monochromatique du corps noir à la **température absolue** *T* et pour la longueur d'onde λ

$$M^{0}_{\lambda,T} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \qquad M^{0}_{\lambda,T} = \frac{2\pi h C^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hC}{k\lambda T}} - 1}$$

  - $M^{0}_{\lambda,T}$: Emittance monochromatique *[W.m⁻².µm⁻¹ ou W.m⁻³]*
  - C : célérité des ondes dans le milieu *[m.s⁻¹]*
  - H : constante de Planck *[J.s]*
  - K : constance de Boltzmann *[J.K⁻¹]*
  - T : température absolue *[K]*
  - λ : longueur d'onde *[m]*
  - $c_1 = 3,74\ 10^{-16}\ W.m^2$ et $c_2 = 1,44\ 10^{-2}\ m.K$

Loi de Planck



Loi de Wien

A retenir!

$$\lambda_m . T = 2898\ \mu m . K$$

$$\boxed{T = 300\ K \qquad \lambda_m = 9{,}6\ \mu m}$$
$$T = 500\ K \qquad \lambda_m = 5{,}8\ \mu m$$
$$T = 750\ K \qquad \lambda_m = 3{,}8\ \mu m$$
$$T = 1\,300\ K \qquad \lambda_m = 2{,}9\ \mu m$$

$$T = 2\,000\ K \qquad \lambda_m = 1{,}44\ \mu m$$
$$T = 3\,000\ K \qquad \lambda_m = 0{,}96\ \mu m$$
$$\boxed{T = 5\,792\ K \qquad \lambda_m = 0{,}50\ \mu m}$$

Loi de Stefan Boltzmann (corps noirs)

- Cette loi permet d’obtenir le flux énergétique total émis par un corps noir à une température donnée T dans un demi-espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre.

$$\boldsymbol{M^0 = \sigma_0 T^4}$$

A retenir!

$$\boldsymbol{\Phi = S M^0 = S \sigma_0 T^4}$$

$$\sigma_0 = 5{,}67.10^{-8}\, W.m^{-2}.K^{-4}$$

T : température absolue en Kelvin!!

Corps réel

Emissivité hémisphérique : $\varepsilon = \dfrac{M}{M^0}$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon`_\lambda . M^0_{\lambda,T} . d\lambda}{\sigma_0 . T^4} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon`_\lambda . M^0_{\lambda,T} . d\lambda}{M^0}$$

Emissivité directionnelle: $\varepsilon_{ox,\lambda} = \dfrac{L_{ox,\lambda}}{L^0_{\lambda,T}}$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon`_{ox,\lambda} . M^0_{\lambda,T} . d\lambda}{\sigma_0 . T^4}$$

Matériaux	ε	Matériaux	ε
Aluminium poli Aluminium oxydé	0,06 0,30	Brique ordinaire Brique réfractaire à 1 000 °C	0,93 0,60
Cuivre poli Cuivre très oxydé	0,04 0,75	Zinc pur très poli Zinc galvanisé	0,02 0,20-0,30
Or pur très poli	0,02		
Argile	0,90	Verre ordinaire	0,94
Carbone (dépôt de noir de fumée)	0,95-0,98	Marbre	0,95
Papier	0,95	Bois suivant essences	0,75-0,95
Peinture aluminium	0,30-0,60	Peinture blanche mat	0,90-0,95
Peinture noire mat	0,90	Peinture à l'huile toutes couleurs	~0,90

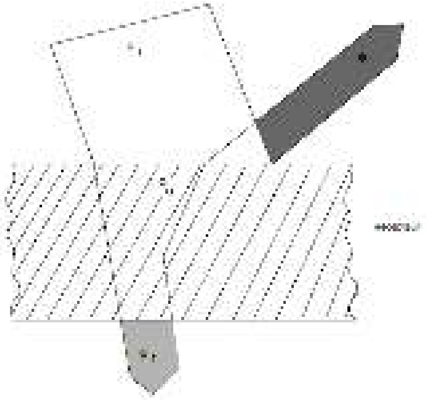
Propriétés de réception

$$Absorptivité : \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$$

$$Transmissivité : \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

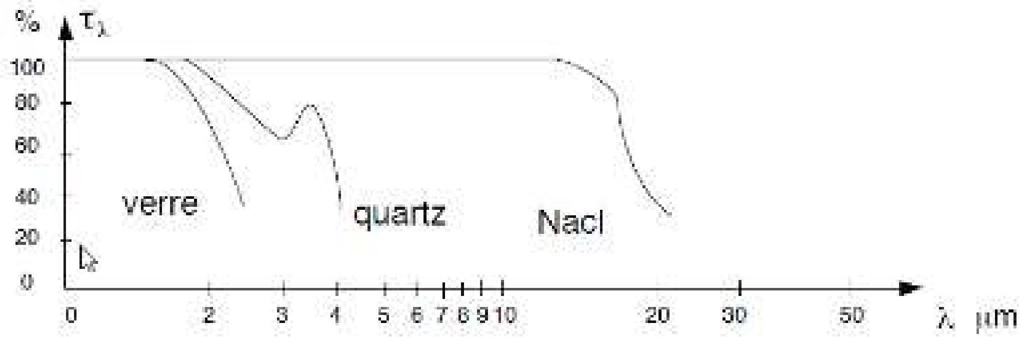
$$Réflectivité : \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$$

$$\boldsymbol{\alpha + \tau + \rho = 1}$$



$$\alpha_\lambda = \frac{\Phi_{a,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \ ; \ \tau_\lambda = \frac{\Phi_{t,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \ ; \ \rho_\lambda = \frac{\Phi_{r,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}}$$

$$\boldsymbol{\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1}$$



Propriétés de réception

$$Absorptivité : \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$$

$$Transmissivité : \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

$$Réflectivité : \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$$

$$\boldsymbol{\alpha + \tau + \rho = 1}$$

Matériaux	α	Matériaux	α
Noir mat	1	Asphalte	0,9
Peinture blanche	0,5	Marbre poli	0,57
Peinture claire	0,6	Granit poli	0,45
Peinture sombre	0,9	Tôle oxydée	0,8
Peinture d'aluminium	0,6	Fonte brute	0,8
Brique rouge	0,8/0,9	Aluminium poli	0,4
Sable	0,7	Plomb	0,7
Eau	0,7	Tôle galvanisée	0,7
Verre	0,06	Maçonnerie de tonalité claire	0,5
Tuile	0,8	Maçonnerie de tonalité moyenne	0,7
Carton bitumé	0,9	Maçonnerie de tonalité sombre	0,9

$$\alpha_\lambda = \frac{\Phi_{a,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \ ; \ \tau_\lambda = \frac{\Phi_{t,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}} \ ; \ \rho_\lambda = \frac{\Phi_{r,\lambda}}{\Phi_{i\lambda}}$$

$$\boldsymbol{\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1}$$

Loi de Kirchoff

$$\varepsilon_{ox,\lambda} = \alpha_{ox,\lambda}$$

Corps gris

A retenir!

- Propriétés indépendantes de la longueur d'ondes

- Corps gris et diffusant (en émission et en diffusant)

$$\alpha_{ox,\lambda} = \alpha_\lambda = \alpha \;\; et \;\; \varepsilon_{ox,\lambda} = \varepsilon_\lambda = \varepsilon$$

$$\varepsilon = \alpha$$

- Corps noir : cas particulier d'un corps gris et diffusant

$$\varepsilon = \alpha = 1$$

Exercices d'application

Température d'équilibre du sol

- Le sol est assimilé à un corps noir. Il est exposé au rayonnement solaire
  - L'éclairement reçu est supposé égal à la densité moyenne de puissance à la surface de la Terre : 340 $W.m^{-2}$.
  - Le sol échange également par rayonnement avec la voûte céleste, à température T_c = 265 K.
- Calculez la température d'équilibre du sol T sol .
  - Discutez ce résultat

Température d'équilibre du sol

- ✓ Flux reçu (et absorbé) : $\Phi_{abs} = E_{solaire} + \sigma_0 T_c^4$
- ✓ Flux émis : $\Phi_{émis} = \sigma_0 T_{sol}^4$
- ✓ Équilibre : $\sigma_0 T_{sol}^4 = E_{solaire} + \sigma_0 T_c^4$

$$T_{sol} = 323\ K$$

Température d’équilibre du sol

- On place au-dessus du sol un écran de verre considéré comme :
  - Parfaitement transparent pour les CLO (soleil)
  - Parfaitement absorbant pour les GLO (ambiance)
- Calculez la nouvelle température d’équilibre du sol T’sol
- Discutez ce résultat

Température d'équilibre du sol

- ✓ Bilan de l'écran : $2 \cdot \sigma_0 T_v^4 = \sigma_0 T_c^4 + \sigma_0 {T'}_{sol}^4$

- ✓ Bilan du sol : $\sigma_0 {T'}_{sol}^4 = E_{solaire} + \sigma_0 T_v^4$

- ✓ Équilibre : $\sigma_0 {T'}_{sol}^4 = 2 \cdot E_{solaire} + \sigma_0 T_c^4$

$$T_{sol} = 361\,K$$

Plaques planes parallèles

- ✓ Au sein d'une paroi de bâtiment, une lame d'air est assimilée à un vide séparant deux plaques planes opaques parallèles, notées A et B.
- ✓ Les deux parois sont grises (absorptivité α) et sont à l'équilibre thermique (températures respectives T_A et T_B).
- ✓ La lame d'air est d'épaisseur suffisamment petite par rapport aux autres dimensions pour considérer que :
  - Les deux plaques sont infinies
  - L'air est immobile

$$\Delta\varphi = R_p - R_a$$

- ✓ Déterminez la densité de flux échangée par rayonnement entre les deux plaques, en évaluant :
  - R_p rayonnement partant de la plaque A
  - R_a rayonnement arrivant sur la plaque A

Plaques planes parallèles

- ✓ Flux Rp partant de A : somme de 2 termes :
  - Rpe : émission de A + réflexions multiples
  - Rpr : réflexion de l' émission de B + réflexions multiples

$$R_{pe} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_A^4 + \rho^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_A^4 + \rho^4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_A^4 + \ldots$$

$$R_{pr} = \varepsilon \cdot \rho \cdot \sigma_0 \cdot T_B^4 + \rho^2 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \sigma_0 \cdot T_B^4 + \ldots$$

$$R_p = \frac{\sigma_0 \cdot T_A^4}{2-\alpha} + (1-\alpha)\frac{\sigma_0 \cdot T_B^4}{2-\alpha}$$

- ✓ Flux Ra arrivant sur A : somme de 2 termes :
  - Rae : émission de B + réflexions multiples
  - Rar : réflexion de l' émission de A + réflexions multiples

$$R_{ae} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_B^4 + \rho^2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_B^4 + \rho^4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_B^4 + \ldots$$

$$R_{ar} = \varepsilon \cdot \rho \cdot \sigma_0 \cdot T_A^4 + \rho^2 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \sigma_0 \cdot T_A^4 + \ldots$$

$$R_a = \frac{\sigma_0 \cdot T_B^4}{2-\alpha} + (1-\alpha)\frac{\sigma_0 \cdot T_A^4}{2-\alpha}$$

$$\Delta\varphi = \frac{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_A^4 - T_B^4\right)}{2-\alpha}$$

Plaques planes parallèles

- ✓ On interpose entre les deux plaques n écrans opaques plats parallèles (même absorptivité α) et températures d'équilibre T_i).
- ✓ Déterminez la nouvelle densité de flux $\Delta\varphi_n$ échangée par rayonnement entre les deux plaques.
- ✓ Calculez T_1 lorsque n = 1
- ✓ Calculez T_1 et T_2 lorsque n = 2

Plaques planes parallèles

- À l'équilibre : $\Delta\varphi_n = \frac{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_A^4 - T_1^4\right)}{2-\alpha} = \frac{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_1^4 - T_2^4\right)}{2-\alpha} = \ldots = \frac{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_n^4 - T_B^4\right)}{2-\alpha}$

$$(n+1)\Delta\varphi_n = \frac{\alpha \cdot \sigma_0 \cdot \left(T_A^4 - T_B^4\right)}{2-\alpha} = \Delta\varphi \qquad \Delta\varphi_n = \frac{\Delta\varphi}{(n+1)}$$

- n = 1

$$\Delta\varphi_1 = \frac{\Delta\varphi}{2} \qquad T_1 = \sqrt[4]{\frac{T_A^4 + T_B^4}{2}}$$

- n = 2

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\Delta\varphi}{3} \qquad T_1 = \sqrt[4]{\frac{2T_A^4 + T_B^4}{3}} \qquad T_2 = \sqrt[4]{\frac{T_A^4 + 2T_B^4}{3}}$$

Lampe à incandescence

✓ Une lampe à incandescence est assimilée à une sphère de rayon R = 4 cm. L'ampoule de verre est supposée d'épaisseur petite devant le rayon. Le filament de tungstène est considéré comme une source ponctuelle placée au centre de la sphère. Cette lampe absorbe une puissance électrique de 75 W. 95 % de cette puissance est transformée en rayonnement. On suppose que l'ambiance rayonne comme un corps noir à température T_a = 20 °C. On cherche à déterminer la température d'équilibre de l'ampoule lorsque la lampe est allumée. On considère que tout le rayonnement de l'ampoule de verre est émis dans le domaine des grandes longueurs d'onde. Les caractéristiques du verre de cette ampoule supposée corps gris sont :

- Pour les courtes longueur d'onde (rayonnement en provenance du filament) :
  - Absorptivité : 0,08
  - Transmittivité : 0,78
- Pour les grandes longueurs d'onde (rayonnement en provenance de sources à température voisine de celle de l'ambiance) :
  - Absorptivité : 0,86
  - Transmittivité : 0

Lampe à incandescence

- Les caractéristiques de l'ampoule sont-elles réalistes ?
- Déterminez :
  - Le flux émis par l'ampoule
  - Les différents termes du flux absorbé par l'ampoule
  - La température d'équilibre de l'ampoule

Lampe à incandescence

- Flux émis : $\Phi_{é} = \varepsilon_2 \cdot \sigma_0 T_v^{\ 4} \cdot 2S \quad avec \quad S = 4\pi R^2$
- Flux absorbé en provenance de l'ambiance : $\Phi_{a,amb} = \alpha_2 \cdot \sigma_0 T_a^{\ 4} \cdot S$
- Flux absorbé en provenance du filament :

$$P = 0{,}95 \cdot 75\,W$$

$$\Phi_{a,fil} = \alpha_1 \cdot P + \alpha_1 \cdot \rho_1 \cdot P + \ldots = \frac{\alpha_1}{1-\rho_1} P$$

- Flux absorbé en provenance de l'ampoule :

$$\Phi_{a,amp} = \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_0 T_v^{\ 4} \cdot S + \rho_2 \cdot \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_0 T_v^{\ 4} \cdot S + \ldots$$

$$\Phi_{a,amp} = \frac{\alpha_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma_0 T_v^{\ 4} \cdot S}{1-\rho_2} = \varepsilon_2 \cdot \sigma_0 T_v^{\ 4} \cdot S$$

$$T_v^{\ 4} = \frac{1}{\varepsilon_2 \cdot \sigma_0 \cdot S}\left(\alpha_2 \cdot \sigma_0 T_a^{\ 4} \cdot S + \frac{\alpha_1}{1-\rho_1} P\right)$$

T_v = 344,8 K = 71,6 °C