

ECHANGES THERMIQUES

1. CARACTERISTIQUES

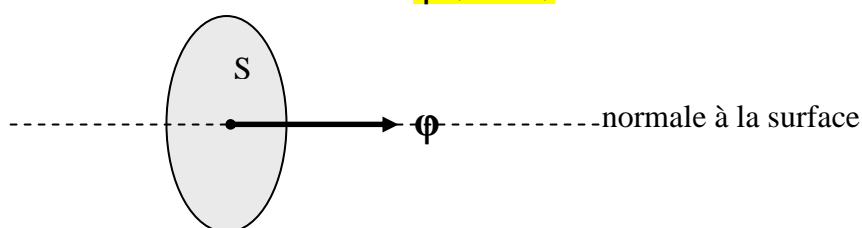
1A. Régime permanent

En régime permanent (ou stationnaire) les températures restent constantes, elles sont indépendantes du temps (par exemple le système de chauffage permet de maintenir la température constante dans un studio l'hiver)

1B. Flux thermique surfacique ϕ et flux thermique Φ

La rapidité avec laquelle les échanges d'énergie par transfert thermique se font est basée sur la notion de :

flux thermique surfacique (on dit aussi) **densité de flux thermique**
 ϕ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)



flux thermique à travers une surface S (m^2) $\Phi = \phi \cdot S$
 Φ (W)

Ce flux a la dimension d'une **puissance**.

1C. Energie thermique

L'énergie est échangée sous forme de **chaleur** Q (J)
 $Q = \Phi \cdot t$

t désigne la durée du transfert thermique (s)
 (ou Q en wattheures, avec Φ en watts et t en heures)

1D. Les échanges thermiques se font par trois modes :

- par **conduction**
- par **convection**
- par **rayonnement**

- Pour la **conduction** ϕ ne dépend que du champ de température :

Transfert de chaleur qui se fait à l'échelle des atomes, ions ou molécules, sans transfert de matière. Chocs entre les particules les plus agitées (zone chaude) sur les particules les moins agitées (zone froide).

- Pour la **convection** ϕ dépend à la fois du champ de température et du champ de vitesse :

Transfert de chaleur qui concerne les fluides.

Transfert à l'échelle macroscopique avec déplacement de matière (il est couplé avec la conduction).

- Pour le **rayonnement** ϕ dépend du champ de température et de la luminance du rayonnement :

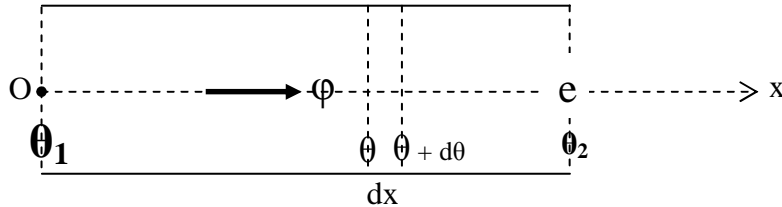
Transfert de chaleur spontané, irréversible, avec émission et absorption de radiations électromagnétiques.

Il coexiste avec la conduction et la convection.

2. TRANSFERT CONDUCTIF

2A. Cylindre conducteur

Considérons un **cylindre conducteur** (corps solide, homogène, isotrope), en régime permanent, calorifugé (pas de pertes thermiques à la paroi latérale qui délimite le corps), de section S , de longueur e , d'axe \vec{Ox} ... dans lequel la direction du **flux de chaleur** est celle de l'axe \vec{Ox} .



Le gradient de température $\frac{d\theta}{dx}$ (variation de la température par rapport à x) est constant.

$$d\theta < 0 - dx > 0$$

écoulement de la chaleur suivant \vec{Ox}

2B. Loi de Fourier

Joseph, mathématicien français, (1768 – 1830)

$$\varphi = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Le signe - s'explique par le fait que la conduction de la chaleur s'effectue vers les températures décroissantes et que φ , le flux thermique surfacique, est compté positivement suivant \vec{Ox} .

Intégrons la loi de Fourier : $d\theta = -\frac{\varphi}{\lambda} dx$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} 1.d\theta = -\frac{\varphi}{\lambda} \int_0^e 1.dx \Leftrightarrow \theta_2 - \theta_1 = -\frac{\varphi}{\lambda} e \Leftrightarrow \theta_1 - \theta_2 = \varphi \cdot \frac{e}{\lambda}$$

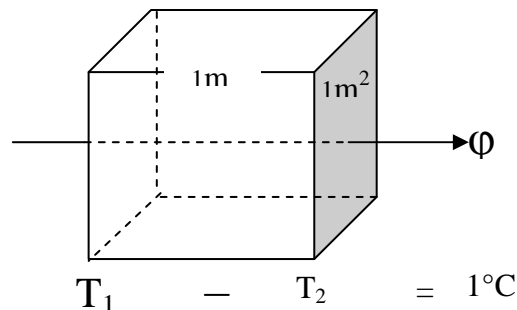
$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{\Phi}{S} \cdot \frac{e}{\lambda} = \Phi \cdot \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

2C. Conductivité thermique λ

2C1. définition de λ

λ : conductivité thermique du matériau

Elle représente le flux de chaleur qui traverse une épaisseur de 1 m de matériau, sur une surface de 1 m^2 , pour un écart de 1°C (1K)



2C2. caractéristiques de λ

- Elle est **grande** pour les matériaux **conducteurs**.
- Elle est **petite** pour les matériaux **isolants**.

($\frac{1}{\lambda}$ représente la **résistivité thermique** du matériau)

- Elle varie avec la température du matériau....on donne une valeur moyenne pour un écart de température donné.
(*exemple* : quand θ augmente, λ augmente, car il y a augmentation de la vitesse des particules)
- Elle s'accroît avec l'humidité contenue dans le matériau.
- La conduction pure n'existe pas, du fait de la présence d'alvéoles plus ou moins grosses dans le

matériau.

- La conduction n'est qu'apparente tenant compte des phénomènes de convection, de rayonnement à l'intérieur des alvéoles.
- Elle n'est jamais nulle, elle se mesure avec un lambda mètre (panneau de laine de verre déposé au bureau international des poids et mesures de Sèvres servant à l'étalonnage de ces appareils).

2D. Profil de température

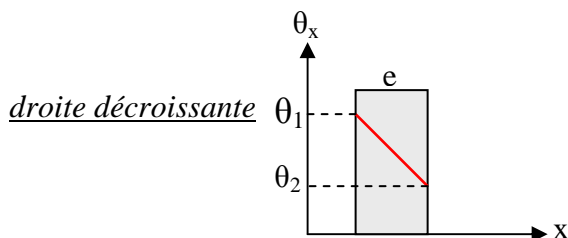
$$d\theta = - \frac{\varphi}{\lambda} dx$$

Intégrons la loi de Fourier entre θ_1 et θ_x à gauche et entre 0 et x à droite

$$\int_{\theta_1}^{\theta_x} 1.d\theta = - \frac{\varphi}{\lambda} \int_0^x 1.dx \Leftrightarrow \theta_x - \theta_1 = - \frac{\varphi}{\lambda} x \Leftrightarrow \theta_x = \theta_1 - \frac{\varphi}{\lambda} x$$

$$\text{avec } \varphi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{e}{\lambda}}$$

$$\theta_x = \theta_1 - \frac{\theta_1 - \theta_2}{e} x$$

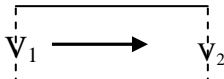


2E. Résistance thermique R

Analogie électrique :

V : potentiel

ΔV : différence de potentiel ou tension



$$R_{\text{électrique}} = \frac{e}{\sigma \cdot S}$$

σ : conductivité électrique

$$R_{\text{électrique}} = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{\Delta V}{I} = \frac{U}{I}$$

I : intensité du courant

• **R** est faible pour les matériaux conducteurs

• **R** est forte pour les matériaux isolants

R : résistance* thermique du matériau, de surface S .

Elle caractérise son aptitude à s'opposer au passage de la chaleur.

R (K.W⁻¹)

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S} \text{ en fonction des caractéristiques du matériau}$$

$$R = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Phi} \text{ en fonction des conditions } R = \frac{\Delta \theta}{\Phi}$$

2F. résistance thermique surfacique r

r : résistance thermique surfacique du matériau pour **1 m²** de surface

r (m².K.W⁻¹)

$$r = R \cdot S$$

$$r = \frac{e}{\lambda}$$

Remarque : pour éviter la confusion entre **R** et **r** il est essentiel de raisonner avec les **unités**.

2_G. Coefficient de transmission thermique surfacique U

U : coefficient de transmission surfacique du matériau...pour **1 m^2** de surface
(ou **conductance thermique surfacique**)

Il représente le flux de chaleur traversant le matériau de 1 m^2 de surface pour une différence de température de 1°C (1K) entre les deux sections de matériau

U ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

$$U = \frac{1}{r}$$

• plus U est grand, plus le matériau est conducteur.

• (U ou K)

2_H. Flux thermiques φ (W.m^{-2}) et Φ (W)

$$\varphi = U.(\theta_1 - \theta_2) = U.\Delta\theta = \frac{\Delta\theta}{r}$$

$$\Phi = \varphi.S = U.S.\Delta\theta$$

φ : flux thermique surfacique

Φ : flux thermique

2_I. Ecart de température $\Delta\theta$ (K ou $^\circ\text{C}$)

$$\theta - \theta = \varphi.r_{\Delta\theta}$$

$$\Delta\theta = \varphi.r_{\Delta\theta}$$

2_J. Température θ ($^\circ\text{C}$)

$$\theta = \theta + \varphi.r_{\Delta\theta}$$

$$\theta = \theta - \varphi.r_{\Delta\theta}$$

2_K. Conductivités thermiques, λ , des matériaux

2_{K1}. mécanismes de propagation

La chaleur se propage selon deux mécanismes :

- Transmission par les vibrations des atomes, ions ou molécules.
- Transmission par les électrons libres.

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_e$$

2_{K2}. propagation et propriétés des matériaux

$$\lambda_e \gg \lambda_v$$

- pour les métaux

- pour les alliages métalliques λ_e est plus faible, la structure est moins ordonnée que celle des métaux.

$$\lambda_v \text{ faible, } \lambda_e \approx 0$$

pour les matériaux, amorphes (pas de structure, ni de périodicité)

isolants thermiques : $\lambda < 0,065$

λ chute beaucoup pour les liquides

Il n'y a plus d'organisation de structure ; sauf pour les métaux fondus et les électrolytes où λ_e est important.

2_{K3}. conduction thermique et conduction électrique

λ dépend de la masse volumique, de la vitesse des molécules, de la capacité thermique massique pour les gaz.

Ce qui explique que les matériaux bons conducteurs du courant sont aussi bons conducteurs thermiques et que les isolants électriques sont souvent isolants thermiques.

2_{K4}. unités

$$\lambda \text{ en } \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

2_{K5}. tableaux de valeurs

a- solides métalliques

Métaux à 0°C	λ
Argent	418
Cuivre	390
Aluminium	238
Zinc	110
Fer	82
Platine	69
Plomb	35
Nickel	20

Alliages à 0°C	λ
Laiton	120
Acier	52
Invar	14

b- liquides

liquides à 20°C	λ
Eau	0,59
Ethanol	0,17
Huile minérale	0,13
Sodium fondu à 98°C	86

c- gaz

Gaz à 27°C	λ
Dihydrogène H ₂	0,182
Hélium He	0,151
Néon Ne	0,049
Dioxygène O ₂	0,027
Diazote N ₂	0,026
Argon Ar	0,018
Dioxyde de carbone CO ₂	0,017
Krypton Kr	0,014

d- matériaux

matériaux à 20°C	λ
Pierres :	
- granite, basalte	3,5
- marbre	2,9
- calcaire dur	2,2
- calcaire tendre	1,0
Béton plein	1,75
Mortier et joint	1,15
Verre	1,15
Béton d'argile expansé	0,7
Plâtre	0,35
Bois	0,12 à 0,23
Contreplaqué	0,12 à 0,15
Fibragglo (béton de fibre de bois)	0,10 à 0,15
Liège comprimé	0,10
Polystyrène expansé :	
- classe 1 (9 à 13 kg.m ⁻³)	0,044
- classe 2 (13 à 16 kg.m ⁻³)	0,042
- classe 3 (16 à 20 kg.m ⁻³)	0,039
- classe 4 (20 à 25 kg.m ⁻³)	0,037
Mousse de polychlorure de vinyle :	
- classe 1 (25 à 35 kg.m ⁻³)	0,031
- classe 2 (35 à 48 kg.m ⁻³)	0,034
Mousse de polyuréthane :	
- rigide (30 à 35 kg.m ⁻³)	0,029
- bloc expansé	0,030
Mousse formophénolique (30 à 35 kg.m ⁻³)	0,037
Autres matières plastiques alvéolées (10 à 60 kg.m ⁻³)	0,0046
Laine de verre	0,035 à 0,055
Laine de roche	0,035 à 0,045
Liège	0,038
Air sec immobile	0,022

Exercice 1 :

Un cylindre de béton, parfaitement calorifugé sur la paroi latérale, a pour longueur $e = 15$ cm et pour diamètre $d = 5$ cm.

Les deux extrémités de ce cylindre sont en contact avec deux sources de chaleur de températures

$\theta_1 = 60^\circ\text{C}$ et $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$ ($T_1 = 333$ K et $T_2 = 293$ K).

Sachant que le **flux thermique** à travers ce cylindre est $\Phi = 0,91163$ W :

1) Exprimer littéralement en fonction de S (la section du cylindre), de e , de l'écart de température $\Delta\theta$ ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$), et d'une caractéristique du béton que l'on précisera :

- le **flux thermique** Φ .

- le **flux thermique surfacique** (ou **densité de flux thermique**) ϕ .

2)...puis Calculer :

a- La **conductivité thermique** λ du béton.

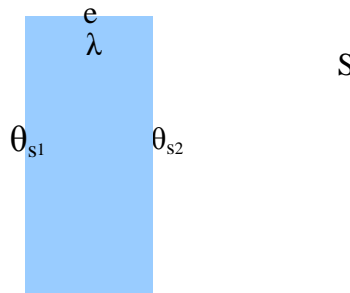
b- Le **flux thermique surfacique** ϕ traversant ce cylindre.

c- La **conductance thermique surfacique** (ou **coefficient de transmission thermique**) U de cette épaisseur de béton.

- d- La **résistance thermique surfacique** r de cette épaisseur de béton.
 e- La **résistance thermique** R de ce cylindre de béton de section S .

Exercice 2 : Application

La **PAROI SIMPLE** ...constituée d'un même matériau.



Exprimer littéralement, puis calculer le **flux thermique surfacique** et le **flux thermique** traversant la paroi, sachant que $e = 15 \text{ cm}$, $\lambda = 1,75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $S = 15,45 \text{ m}^2$ et $\Delta\theta = \theta_{s1} - \theta_{s2} = 30^\circ\text{C}$.

•Exercice 3 :

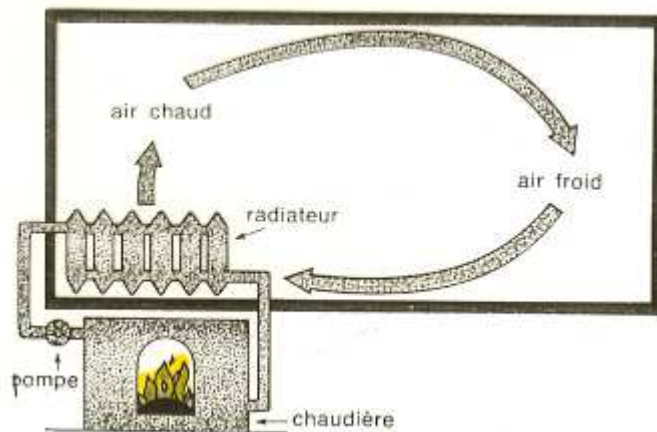
Après avoir rappeler l'expression de l'unité « watt » en unité du système international, exprimer les grandeurs utilisées dans ce début de cours en unités de ce système international

3. TRANSFERT CONVECTIF

3A. Dilatation et convection

La dilatation entraîne une augmentation de la masse volumique.

L'eau chaude, l'air chaud vont s'élever.



La convection ne concerne que les fluides (*liquides* ou *gaz*).

3B. Convection

3B1. mise en évidence

Elle se produit par déplacement des particules (atomes, ions ou molécules).

3B2. convection naturelle

Elle apparaît spontanément, elle est due aux variations de masses volumiques consécutives à la dilatation. Des échanges de chaleur se produisent entre le fluide et un solide.

Exemples : au contact du radiateur de chauffage central, l'air s'échauffe et devient moins dense, puis s'élève vers le plafond en se refroidissant, devenu plus dense il redescend, puis le cycle se renouvelle.

3_{B3}. convection forcée

Le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure (*pompe, ventilateur*).
Utilisation nécessaire pour accroître la puissance du transfert thermique.

Exemple : dans une installation de chauffage central, la pompe force la convection de l'eau, utilisée comme fluide caloporteur.

3_C. Interface fluide/solide

Lors de l'**interface fluide/solide**, à cause de la viscosité la vitesse du fluide est nulle sur la paroi. Cette vitesse augmente progressivement dans une zone de 1 à 2 cm d'épaisseur ^{*}.

Tout se passe comme si à l'interface se trouvait une couche de passage très mince et de très faible conductivité qui joue le rôle d'isolant.

Le mouvement du fluide devient plus complexe dès que l'on quitte cette zone.

La chaleur a beaucoup de difficulté à traverser la surface de séparation de deux milieux, elle se propage avec facilité dans un milieu homogène.

3_D. résistance thermique surfacique superficielle r_s

Il apparaît donc au niveau de la surface de séparation une brusque variation de température, ce qui se traduit par une **résistance thermique surfacique superficielle r_s** ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).
(elle traduit l'effet de convection le long de la paroi)

3_E. Coefficient de transmission convectif h

h rappelle U , h en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

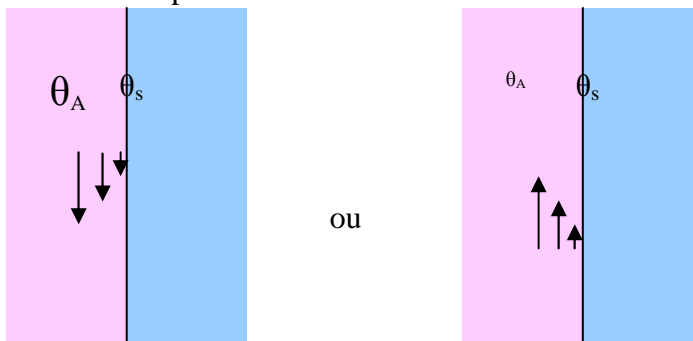
h est homogène à $\frac{\lambda}{e}$, e : épaisseur du film laminaire et λ : conductivité du fluide.

$$(r_s = \frac{1}{h})$$

3_F. Flux thermique surfacique (densité de flux thermique)

$$\varphi = h \cdot |\theta_A - \theta_s|$$

- φ : densité de flux thermique échangé entre le fluide et la paroi ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
- $\theta_A - \theta_s$: écart de température entre le fluide ambiant et la paroi.
- φ est donc le flux de chaleur passant du fluide à la paroi pour 1°C d'écart de température entre la surface de la paroi et le fluide ambiant.



3_G. e : épaisseur du film laminaire

Cette épaisseur e dépend de la nature du fluide, de l'état de surface de la paroi, de la température, de la vitesse de déplacement ; elle est d'autant plus petite que le gradient de vitesse est grand.

La paroi d'une théière contenant un liquide bouillant est moins chaude que ce dernier, mais plus chaude que l'air qui l'entoure.

Dans le double vitrage l'épaisseur de gaz enfermé est limitée, pour que le gaz emprisonné n'est pas de convection et ainsi avoir une isolation plus efficace.

Exercice 4 :

Une paroi sépare deux ambiances 1 et 2 aux températures θ_{A1} et θ_{A2} ($\theta_{A1} > \theta_{A2}$).

1) Sachant que le flux de chaleur passant du fluide à la température θ_{A1} à la paroi à la température $\theta_{s1} = 7,1^\circ\text{C}$ est égal à $\varphi = 117 \text{ W.m}^{-2}$, calculer la température ambiante θ_{A1} .

($h_1 = 9,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, coefficient de transfert convectif du côté de l'ambiance 1)

2) En déduire r_1 , la résistance thermique surfacique superficielle.

3) De l'autre côté de la paroi, le flux de chaleur étant le même ($\varphi = 117 \text{ W.m}^{-2}$), sachant que la température de paroi est $\theta_{s2} = -2,9^\circ\text{C}$, et que la température de l'ambiance 2 est $\theta_{A2} = -10^\circ\text{C}$, déterminer le coefficient de transfert convectif h_2 , et la résistance thermique surfacique superficielle r_2 du côté de l'ambiance 2.

4) Comme pour la conduction, on définit une résistance thermique (de convection) $R = \frac{r}{S}$, S étant la surface de la paroi, $S = 15,45 \text{ m}^2$.

Calculer R_1 et R_2 , les résistances thermiques côté ambiance 1 et côté ambiance 2.

3H. h : coefficient de transfert conducto-radio-convectif

Le coefficient **h** est difficile à calculer, mais il est parfaitement mesurable.

Il dépend de l'écart de température, de la viscosité du fluide, de l'écoulement du fluide, de la condensation sur la paroi.

De plus, au transfert thermique convectif, viennent s'ajouter :

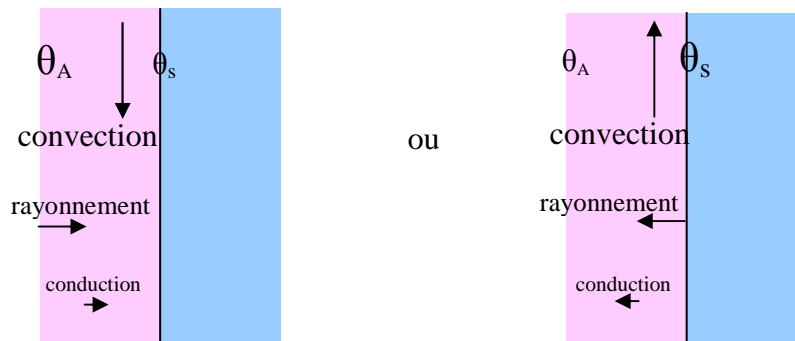
- un transfert thermique radiatif* (voir 4)

et

- un transfert thermique conductif*

* : par ondes électromagnétiques entre deux corps de températures différentes (entre paroi et fluide ou inversement par exemple).

* : entre paroi et fluide ou inversement, à travers le film laminaire.



Le coefficient h prend en compte ces trois phénomènes simultanés.

C'est un **coefficient de transfert conducto-radio-convectif**, on dit aussi...

...**coefficient d'échange superficiel**.

h : ce coefficient ne peut exister qu'entre une **paroi** et un **fluide** (gaz ou liquide).

Pour une paroi extérieure, h_e s'accroît avec la vitesse du vent.

Nous sommes « fin prêt » pour traiter de thermique dans le bâtiment.

4. TRANSFERT RADIATIF

4A. Origine

Ce sont certaines ondes électromagnétiques qui sont responsables de ce transfert.

Elles peuvent se propager dans le vide.

(le soleil nous chauffe, le charbon incandescent rayonne, le four micro-ondes réchauffe les aliments...)

4B. Grandeurs associées aux ondes

Les ondes sont classées suivant leurs fréquences f .

A chaque fréquence on associe une longueur d'onde λ .

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c : célérité (ou vitesse) de l'onde (m.s^{-1}) - $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ dans le vide.

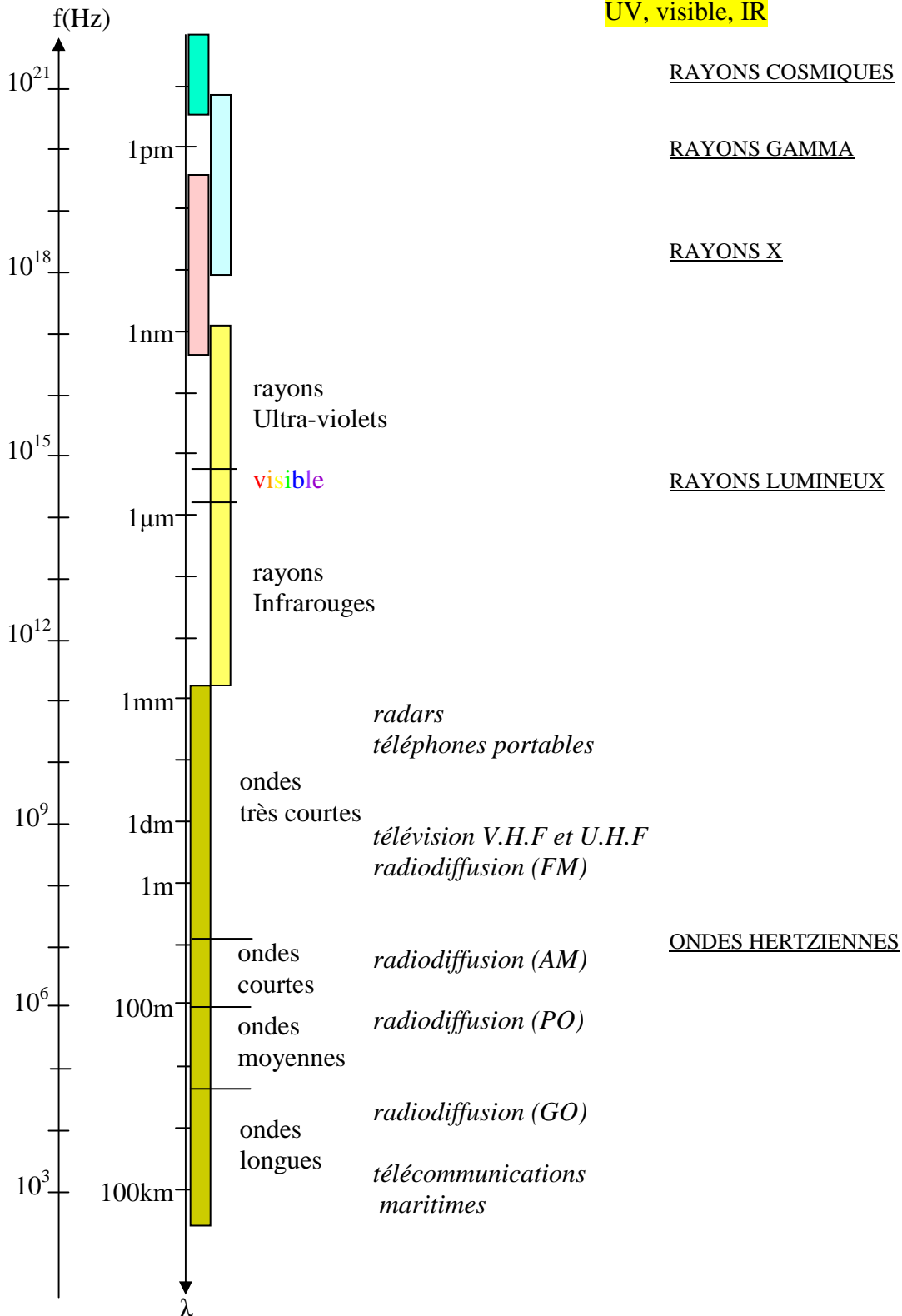
f : fréquence de l'onde (Hz).

λ : longueur d'onde (m).

4c. Spectre des ondes électromagnétiques

L'ensemble de ces fréquences s'appelle **spectre**
dont une partie constitue les **radiations lumineuses**

UV, visible, IR



4D. Radiations lumineuses

4D1. description

a- visibles

Radiations auxquelles l'œil est sensible.

b- UV

Radiations ultra-violettes qui ont un effet biologique, pouvoir bactéricide, pigmentation de la peau, synthèse d'une substance nécessaire aux os.

L'énergie rayonnante se transforme en :

- énergie électrique dans les cellules photoélectriques,
- énergie chimique dans les réactions photochimiques,
- énergie rayonnante de radiations visibles en fluorescence.

c- IR

Radiations infrarouges émises par tous les corps portés à température élevée, l'énergie rayonnante se transforme le plus souvent en énergie thermique.

(échauffement des serres vitrées, fours à IR, lampes à IR, émulsions photographiques spéciales...)

4D2. origine

Les radiations lumineuses sont émises quand en donnant de l'énergie à un atome un électron se trouvant sur son niveau fondamental passe à un état excité...mais a tendance à retourner à l'état fondamental, en restituant cette énergie.

4D3. ondes et photons

L'énergie* restituée se traduit par la formation d'une **onde** à laquelle on associe des « grains de lumière » : les **photons**, particules de masse nulle qui possèdent de l'énergie et qui se suivent sans arrêt.

* : énergie restituée = $h \cdot f$

f est la fréquence de la radiation émise (Hz ou s^{-1})

h est la constante de Planck*, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s

(* ...Max, physicien allemand, 1858-1947)

L'énergie est sous la forme d'une vibration d'électricité centrée sur le grain.

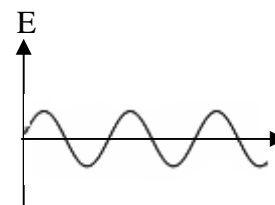
(*champ électrique vibratoire accompagné d'un champ magnétique qui varie de façon sinusoïdale*).

f représente le nombre de vibrations par seconde (pour le soleil le flux est d'environ $(600 \cdot 10^9) \cdot 10^9$ photons par seconde, un flux lumineux de 200 photons par seconde donne l'impression d'un point lumineux, un flux de 7 photons par seconde celle d'un scintillement)

La vie du photon commence quand il est émis, et se termine par son absorption.

Plus f est grand, plus le photon a de l'énergie.

L'onde électromagnétique est donc une combinaison de la vibration et du mouvement (c'est comme à la surface de l'eau quand on jette un caillou).



4D4. ondes et matière

La lumière émise par un atome est caractéristique de la matière (l'étude de la lumière émise par les étoiles permet de connaître leur composition chimique, leur vitesse de déplacement...).

La lumière visible représente 42% des ondes émises par le soleil, IR 55% et UV 3%.

4E. Radiations non lumineuses

Les rayons cosmiques sont des particules chargées (protons, électrons...) très rapides provenant du milieu

interstellaire.

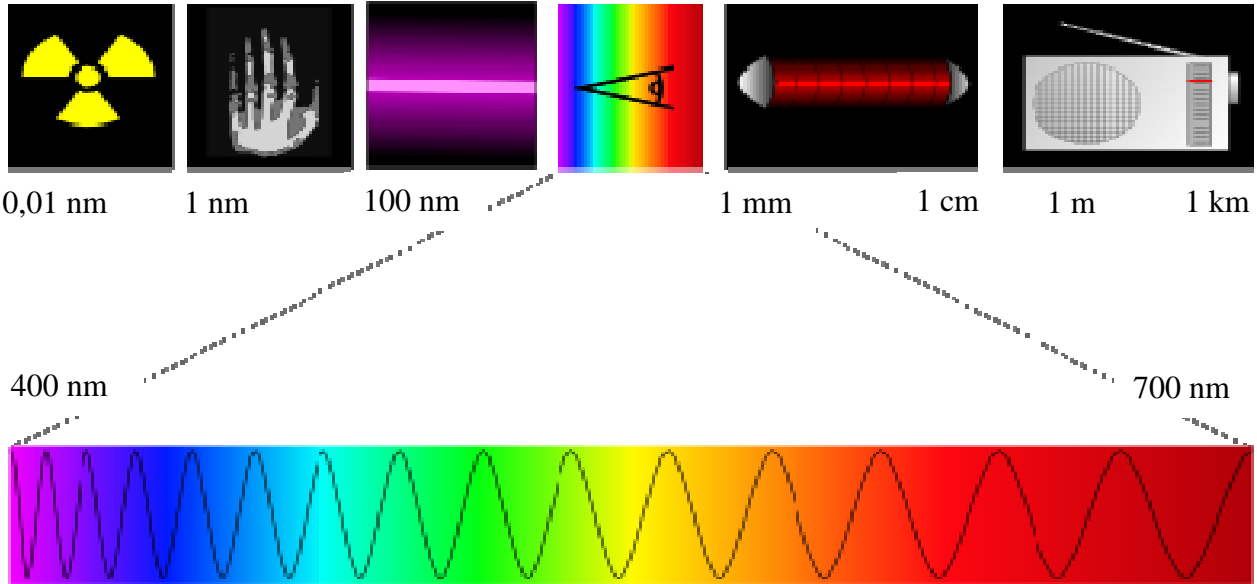
Les rayons X sont produits par les électrons des couches intérieures de l'atome (*médecine*).

Les rayons gamma sont produits par les corps radioactifs.

Les ondes hertziennes sont créées dans des circuits oscillants.

Les différentes zones du spectre ne sont pas bien définies, elles empiètent l'une sur l'autre.

4F. Exemples de longueurs d'ondes (λ)

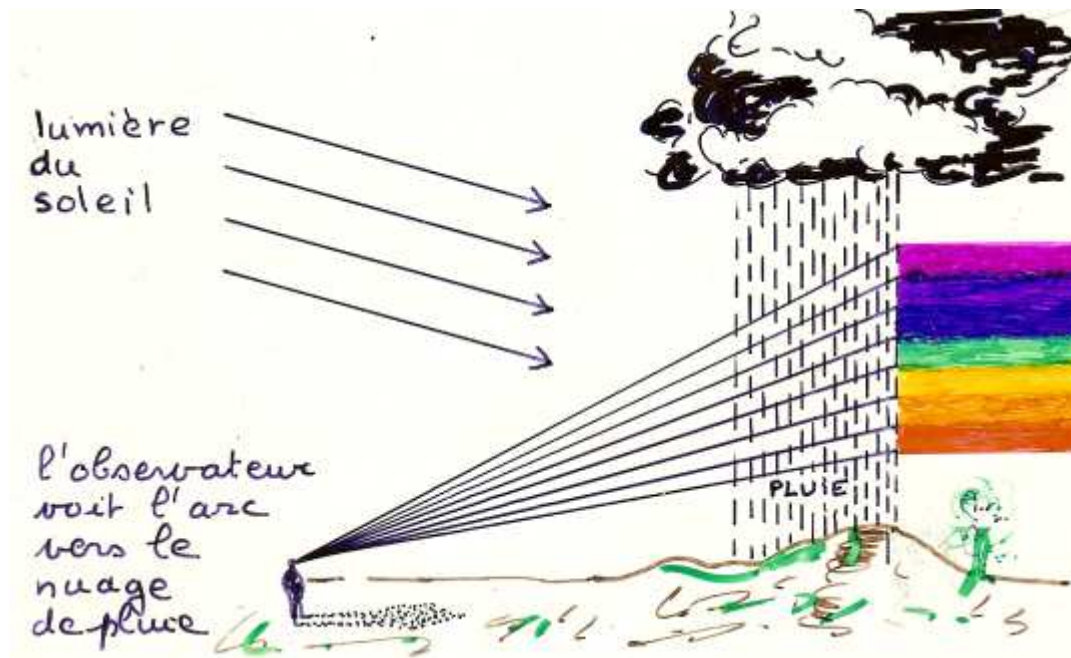


4G. L'arc en ciel

l' ARC EN CIEL

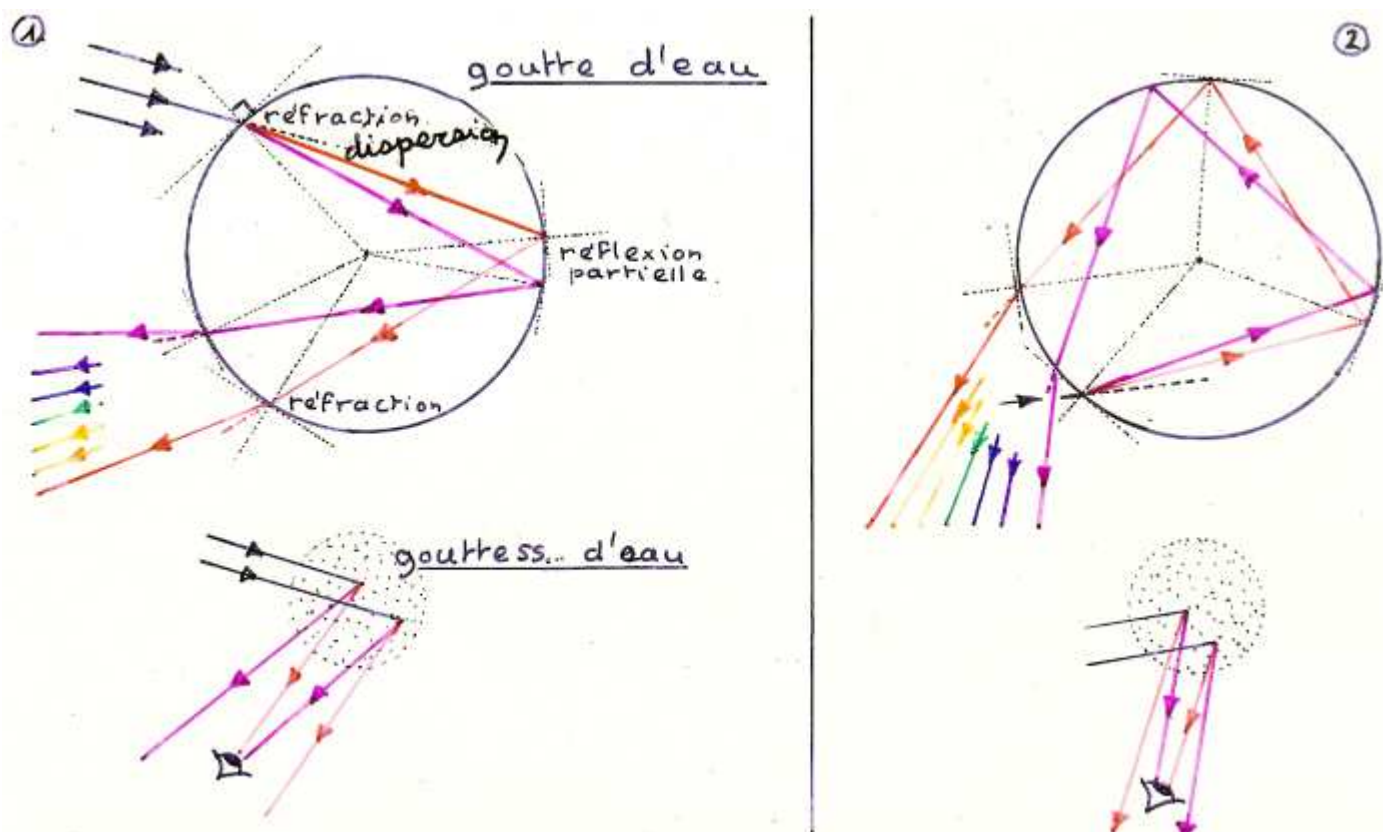
Il se forme quand la lumière solaire, provenant de derrière l'observateur, frappe les gouttes d'eau dans son champ de vision.

Telle une myriade de prismes minuscules, les gouttes décomposent la lumière en un spectre immense incurvé.



Cet arc irisé est obtenu après réfraction, dispersion et réflexion de la lumière solaire.

On observe en général deux arcs en ciel :
arc en ciel primaire 1 et arc en ciel secondaire 2



L'arc en ciel secondaire est *moins lumineux*... (parfois, on peut observer un arc en ciel tertiaire...)

4_H. Le corps noir

4_{H1}. caractéristiques

Récepteur intégral :

Corps idéal qui absorberait de façon identique toute l'énergie rayonnante qu'il reçoit, quelque soit la longueur d'onde et quelque soit la direction du rayonnement.
Il ne réfléchit rien, il n'a aucune transparence.

Radiateur intégral :

C'est le meilleur émetteur à une température donnée.

4_{H2}. exemples

On ne peut pas le trouver dans la nature :

Un objet recouvert de noir de fumée se comporte comme un corps noir, éclairé par de la lumière blanche il n'est pas coloré et sa couleur est proche du noir.

Certains corps ont des comportements proches d'un corps noir :

Soleil, filament d'une lampe à incandescence...

On sait fabriquer des dispositifs (*piège à radiation*) qui se comportent comme un corps noir :

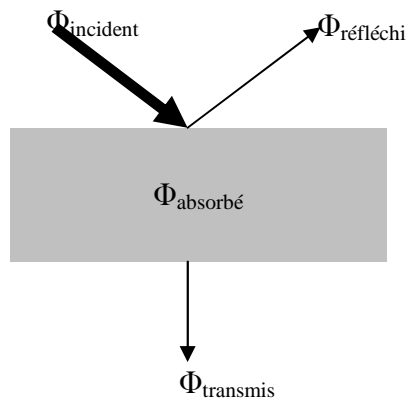
Un rayonnement pénètre par une petite ouverture d'une enceinte imperméable à la chaleur, l'intérieur étant noirci, ce rayonnement subit un petit nombre de réflexions et ne peut donc pas ressortir, l'énergie, étant entièrement absorbée.

4_{H3}. propriétés énergétiques

$$\text{facteur de réflexion : } r = \frac{\Phi_{\text{réfléchi}}}{\Phi_{\text{incident}}}$$

$$\text{facteur de transmission : } t = \frac{\Phi_{\text{transmis}}}{\Phi_{\text{incident}}}$$

$$\text{facteur d'absorption : } a = \frac{\Phi_{\text{absorbé}}}{\Phi_{\text{incident}}}$$



Conservation de l'énergie : $\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$

$$\Phi_i = r \cdot \Phi_i + a \cdot \Phi_i + t \cdot \Phi_i \quad \Phi_i = (r + a + t) \cdot \Phi_i$$

$$\mathbf{r + a + t = 1}$$

Corps noir : $\mathbf{a = 1}$; $r = t = 0$

Corps transparent : $a = r = 0$; $t = 1$

Réflecteur parfait : $a = t = 0$; $r = 1$

peintures	r	matériaux	r
Blanche	0,75	Plâtre	0,85
Crème	0,70	Pierre de taille	0,50
Jaune	0,50	Ciment	0,40
Vert clair	0,45	Brique rouge	0,20
Gris à 25% de noir	0,35	Erable	0,20
Rouge	0,25	Chêne	0,20
Vert foncé	0,20	Acajou	0,10

4_I. Lois du rayonnement

4_{I1}. loi de Stéphan

(..Joseph, physicien autrichien, 1835-1893)

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = \sigma \cdot T^4 = M$$

Φ (W) : flux thermique, $\Phi = M \cdot S = \sigma \cdot T^4 \cdot S$

S (m²) : surface de l'émetteur

φ (W.m⁻²) : densité de flux thermique

ou

flux énergétique surfacique

ou

exitance (émittance) énergétique (φ ou **M** ou J)

T (K) : température absolue

σ (W.m⁻².K⁻⁴) : constante de Stéphan

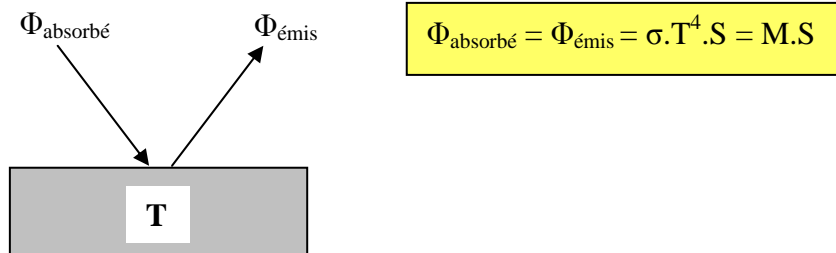
(**corps noir** : $\sigma^0 = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

$\sigma = \eta \cdot \sigma^0$ η étant le facteur d'émission du corps ($\eta < 1$)

4_{I2}. équilibre radiatif

Un corps est en équilibre radiatif quand le flux absorbé est intégralement réémis.

Sa température T reste fixe.



4_{I3}. loi de Wien* et de Planck

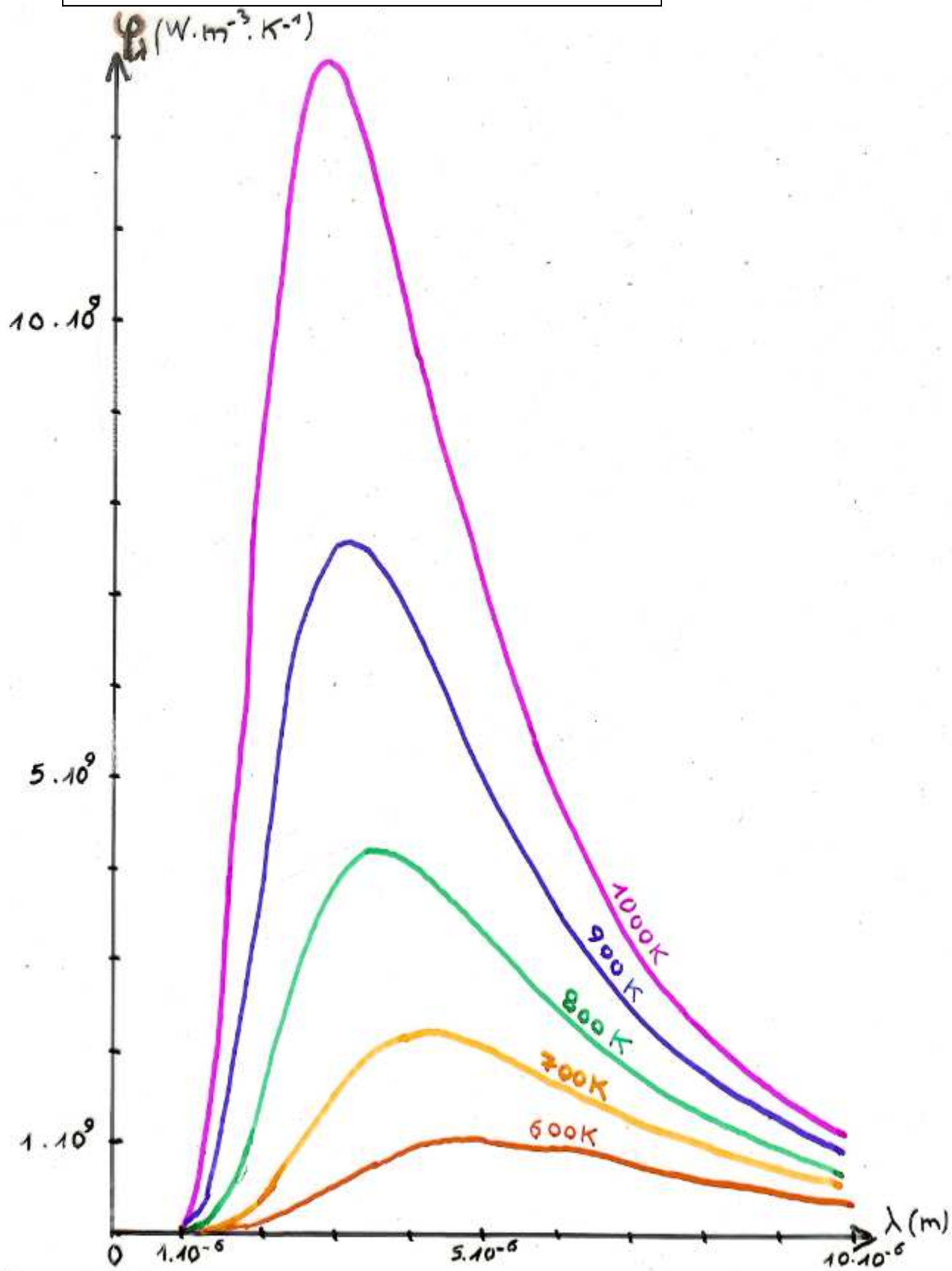
(*Wilhem, physicien allemand, 1864-1928)

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2900 \cdot 10^{-6} \text{ K.m}$$

λ_{\max} désigne la longueur d'onde du maximum de la courbe donnant la répartition spectrale du rayonnement thermique d'équilibre du corps.

4_{I4}. densité de flux, longueur d'onde et température

ϕ_λ (W.m⁻³.K⁻¹)
 densité de flux (W.m⁻²) par unité de longueur d'onde (m⁻¹)
 et par unité de température (K⁻¹)



Exercice 1 :

Un système au repos, de masse m , possède une énergie de masse E
*donnée par la relation d'Einstein **

$$E = m.c^2$$

c : célérité de la lumière $c = 3,0.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

m : masse (kg)

E : énergie (J)

* Albert, physicien allemand, 1879-1955

A toute variation de masse Δm d'un système correspond une variation de son énergie de masse ΔE .

$$\Delta E = \Delta m.c^2$$

La masse du **SOLEIL** diminue, son énergie aussi.

L'énergie ainsi libérée est fournie dans l'univers.

Mais pendant encore des milliards d'années il nous enverra du **RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE**

1) Dans le soleil 564.10^6 t de dihydrogène sont transformées chaque seconde en 560.10^6 t d'hélium, au cours d'une réaction nucléaire appelée : *fusion*.

Calculer à l'aide de la relation d'Einstein l'énergie libérée chaque seconde (*donc la puissance ou le flux énergétique émis par le soleil*) lors de cette perte de masse.

2) Le soleil est assimilé à un corps noir ayant la forme d'une sphère de 695000 km de rayon.

a) Calculer l'exitance du soleil.

b) En déduire la température de surface du soleil.

c) Calculer la longueur d'onde maximale du spectre du soleil ; où se trouve-t-elle dans le spectre ?

3) La **TERRE** reçoit un deux milliardième de la puissance émise par le soleil.

a) Calculer la puissance reçue par la terre.

b) L'absorption, la réflexion et la diffusion affaiblissent le rayonnement solaire de 30% environ, quelle est la puissance réellement reçue par la terre.

c) La terre a un rayon de 6380 km, quelle est la puissance reçue par mètre carré ?

4) Sur la terre, on suppose un corps noir de 1m^2 qui reçoit un flux de 1000 W.

On négligera les pertes de chaleur par conduction et par convection.

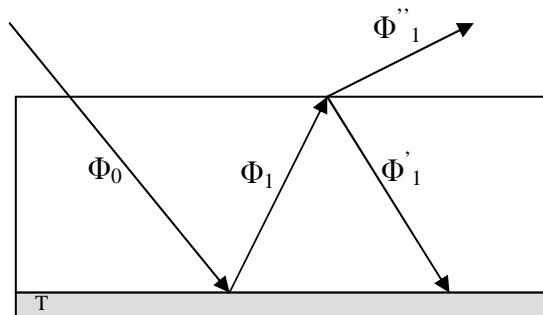
a) Calculer la température de surface de ce corps.

b) Quelle va être la longueur d'onde maximale du rayonnement émis par ce corps ?

c) A quel domaine de rayonnement appartient cette longueur d'onde ?

4. Effet de serre - loi

4.1. mise en évidence



A l'équilibre radiatif : $\Phi_0 + \Phi'_1 = \Phi_1$

Les matériaux (*verre, matières plastiques...*), la couche de CO_2 , CH_4 , CFC autour de la terre, sont transparents à certaines longueurs d'ondes mais pas à d'autres.

(le verre, par exemple, est transparent au visible et aux IR courts, il est opaque pour $\lambda > 3 \mu\text{m}$)

Exercice 2 :

Sur la terre, on suppose une plaque noircie de 1 m^2 , agissant comme un corps noir.

1) Sachant que le flux thermique $\Phi_0 = 1000 \text{ W}$ traverse intégralement le matériau entourant la plaque, que la plaque s'échauffe, puis émet Φ_1 dans l'infrarouge lointain, calculer ce flux émis par la plaque à l'équilibre radiatif, ... le matériau absorbe entièrement le rayonnement IR émis par la plaque, il en renvoie la moitié (Φ''_1) vers l'extérieur et l'autre moitié (Φ'_1) vers l'intérieur.

2) En déduire la température de la plaque.

Exercice 3 :

Un corps noir dont la surface est exposée normalement aux rayons solaires, et qui ne perd de chaleur que par cette surface, est placé à une distance du soleil telle que sa température prenne la valeur $T_1 = 410 \text{ K}$.

Quelle serait sa nouvelle température d'équilibre T_2 s'il était recouvert d'une lame transparente dont le facteur de réflexion est $r = 0,05$ et le facteur d'absorption $a = 0,05$ pour le rayonnement du soleil ; ces grandeurs ayant pour valeurs $r' = 0,2$ et $a' = 0,7$ pour le rayonnement venant du corps noir ?

• Exercice 4 :

Deux grands plans parallèles et voisins A_1 et A_2 d'aires $S = 1 \text{ m}^2$, assimilables à des corps noirs, sont maintenus respectivement aux températures $T_1 = 300 \text{ K}$ et $T_2 = 200 \text{ K}$.

L'espace qui les sépare est vide.

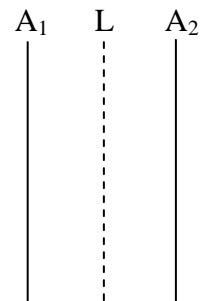
1) Calculer la perte de chaleur ΔP d' A_1 par seconde.

Une mince feuille d'aluminium L , de facteur d'absorption $a = 0,10$ et de facteur de transmission nul, est placée entre A_1 et A_2 .

A l'équilibre ses deux faces ont sensiblement la même température T .

2) Calculer t .

3) Calculer la nouvelle perte $\Delta P'$ d' A_1 .



Exercice 5 :

Calculer la longueur d'onde correspondant à l'émission énergétique maximale du corps humain.

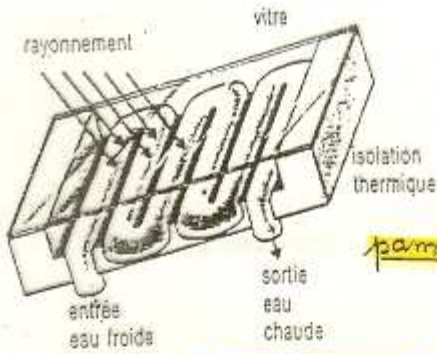
Exercice 6 :

Le filament de tungstène, d'une lampe à incandescence (*longueur 10 cm ; diamètre 0,5 mm*) de puissance 150 W a un rendement de 5%.

1) Calculer le flux énergétique émis par ce filament et sa surface.

- 2) Calculer l'exitance énergétique du filament, et en déduire sa température d'équilibre sachant qu'il n'agit pas comme un corps noir (*coefficient d'émission* $\eta = 0,21$).
- 3) Quelle est la longueur d'onde maximale du spectre émis ?

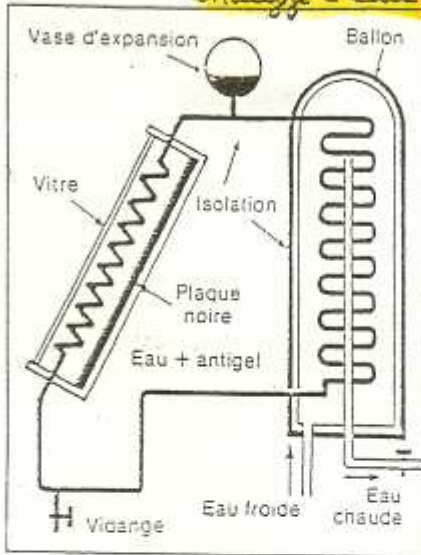
4_{J2}. applications



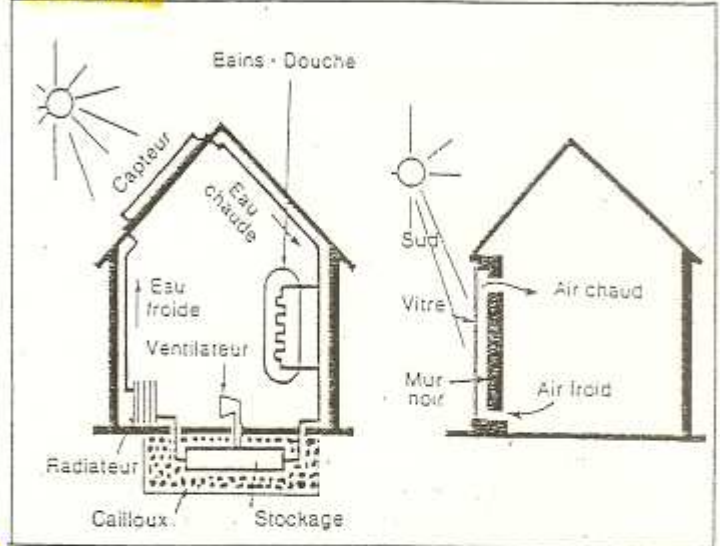
effet de serre

panneau solaire

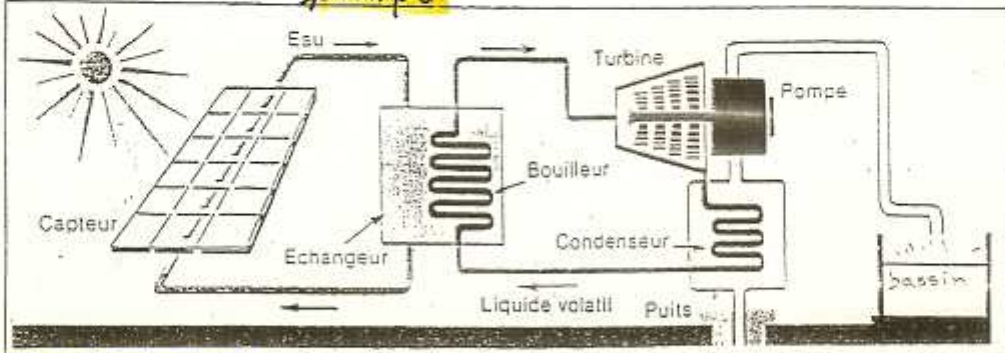
chauffe-eau



maison

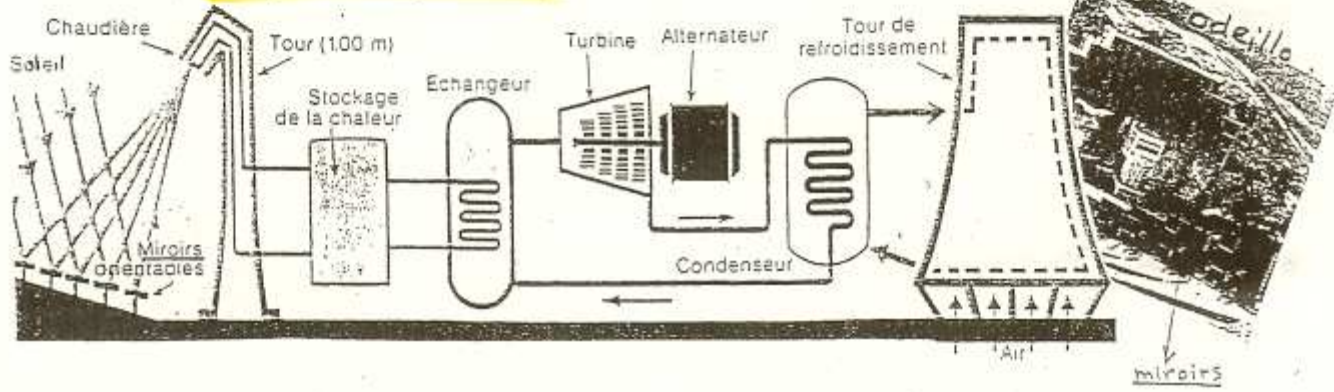


pompe



soleil et miroirs

centrale solaire



4_K. Les rayonnements ultraviolets (UV)

Ils se divisent en trois catégories de puissance énergétique croissante : **UVA**, **UVB** et **UVC**.

4_{K1}. UVB

B, comme brûlure.

Ils sont responsables :

- à court terme, du coup de soleil, véritable signal d'alarme naturel,
- à moyen terme, du bronzage,
- à long terme, en cas d'abus de soleil, ils sont à l'origine de certains cancers cutanés.

Ils endommagent les organismes vivants, mais aussi les matériaux.

4_{K2}. UVA

A, comme âge et allergies.

Presque plus dangereux que les UVB, car il n'existe pas de signal d'alarme comme le coup de soleil.

Quand on s'aperçoit des dégâts, il est déjà trop tard.

Ils font vieillir la peau prématurément.

Ils sont également à l'origine de la plupart des photodermatoses dont les lucites ou « allergies » solaires, ces petits boutons rouges qui apparaissent dès les premières expositions sur les bras et le décolleté, et qui s'accompagnent de fortes démangeaisons.

Sur le long terme, en cas d'abus de soleil, ils peuvent provoquer des cancers cutanés.

4_{K3}. UVC

Ils sont absorbés par le dioxygène de l'air de l'atmosphère, ils ne nous atteignent pas.

4_{K4}. indice de protection

L'indice de protection, est un coefficient qui mesure la capacité d'un produit à retarder l'apparition d'un coup de soleil ou érythème solaire, ainsi un produit d'indice 60 vous protégera 2 fois plus qu'un produit d'indice 30.