

## Fiches professeur

### Transferts thermiques : conduction, convection, rayonnement. Flux thermique, résistance thermique.

#### Caractéristiques thermiques des matériaux.

##### I. APPROCHE SUCCINCTE DES 3 MODES DE TRANSFERTS THERMIQUES.

###### 1. Conduction

Uniquement dans les solides, l'agitation thermique des zones chaudes se transmet vers les zones froides, c'est un phénomène de transport de l'énergie interne dû à une hétérogénéité de l'agitation moléculaire, elle est assurée conjointement par les électrons de conduction et les vibrations du réseau cristallin.

###### 2. Convection

Uniquement dans les fluides, les masses de fluides au contact d'une source plus chaude se dilatent, celle-ci s'élèvent à cause de la poussée d'Archimède elles sont remplacé par des masses plus froides donc plus lourdes. Ce phénomène permet de prélever ou d'évacuer de l'énergie de la source chaude. Dans les fluides la convection l'emporte sur la conduction,

###### 3. Rayonnement

Un corps émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est qu'il peut se propager dans le vide. Au niveau microscopique, on peut indiquer que plus la température du corps est élevée, plus l'agitation thermique responsable de l'émission est élevée, une image simpliste est que parmi les éléments soumis à l'agitation il y a des particules qui possèdent des charges électriques celle-ci émettent un rayonnement comme dans le cas d'une antenne. Le rayonnement thermique est rapidement amorti dans les solides, l'énergie du rayonnement est déposé à « l'entrée » du solide.

###### 4. Expériences

il est facile avec des exemples pratiques issues d'observations courantes d'illustrer les modes de transferts décrits ci-dessus.

##### II. FLUX DE CHALEUR, DIFFERENCE DE TEMPERATURES ET RESISTANCES THERMIQUES

Entre 2 régions dans des états thermiques différents mesurés par les températures  $T_c$  et  $T_f$  (indépendantes du temps, régime permanent), va apparaître un flux thermique  $\varphi$  (transfert de puissance thermique par unité de surface :  $W.m^{-2}$ ) dont les mécanismes sont décrit ci-dessus. Le  $\varphi$  résultant de cette différence  $T_c - T_f$  dépend des mécanismes de transfert mis en jeu et de la nature des milieux traversés, pour tenir compte de ces 2 paramètres on introduit une nouvelle grandeur nommée résistance thermique que l'on note  $r$

$$r = \frac{T_c - T_f}{\phi}$$

La résistance thermique  $r$  quantifie l'opposition à un flux de chaleur entre deux régions  $T_c$  et  $T_f$  entre lesquelles s'échange un flux  $\phi$  exprimé en  $W.m^{-2}$ . Cette définition est valable à condition que la surface de passage  $S$  ( $m^2$ ) de la puissance thermique  $\phi$  ( $w$ ) soit constante.

### III. ANALYSE DE LA CONDUCTION DANS LE CAS D'UN MUR PLAN D'ÉPAISSEUR $e$ HOMOGENE EN RÉGIME PERMANENT

Dans ce cas la résistance thermique prends une forme simple :  $r = \frac{e}{\lambda}$ , ou

$\lambda$  ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) caractérise les propriétés de conduction du matériaux que l'on nomme conductivité thermique, en effet  $\lambda$  pour une épaisseur  $e$  donnée est calculé à partir de l'inverse de la résistance thermique  $r$ . A noter que la valeur de  $\lambda$  est l'information portée sur les isolants que l'on trouve dans le commerce, on peut aussi trouver la valeur de la résistance thermique.

### IV. CAS D'UN MUR PLAN COMPOSE DE PLUSIEURS MATERIAUX ( $e_i$ ; $\lambda_i$ )

on obtient la résistance thermique équivalente :  $r = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i}$

### V. RESISTANCE THERMIQUE DANS LE CAS DE LA CONVECTION

On ne peut pas ici définir d'épaisseur, de plus le phénomène est difficile à décrire par une relation simple, il est possible par contre de manière expérimentale de relier le flux thermique convectif  $\phi$  à la différence de température  $T_c - T_f$ :

$\phi = h_c(T_c - T_f)$  avec  $h_c$  ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) coefficient de convection thermique qui n'est

autre que l'inverse de la résistance thermique défini en II :  $r = \frac{1}{h_c}$

### VI. RESISTANCE THERMIQUE DANS LE CAS DU RAYONNEMENT

De la même façon que pour la convection il est possible de relier le flux thermique rayonné  $\phi$  à la différence de température  $T_c - T_f$ :

$\phi = h_r(T_c - T_f)$  avec  $h_r$  coefficient de rayonnement thermique qui n'est autre que

l'inverse de la résistance thermique défini en II :  $r = \frac{1}{h_r}$

### VII. RESISTANCE THERMIQUE DANS LE CAS D'UN COUPLAGE RAYONNEMENT + CONVECTION

Dans un fluide les 2 mécanismes participent au transfert du flux thermique  $\phi$ .

$\phi = \phi(\text{convection}) + \phi(\text{rayonnement})$  on obtient  $r = \frac{1}{h_c + h_r} = \frac{1}{h_g}$  avec  $h_g$  coefficient

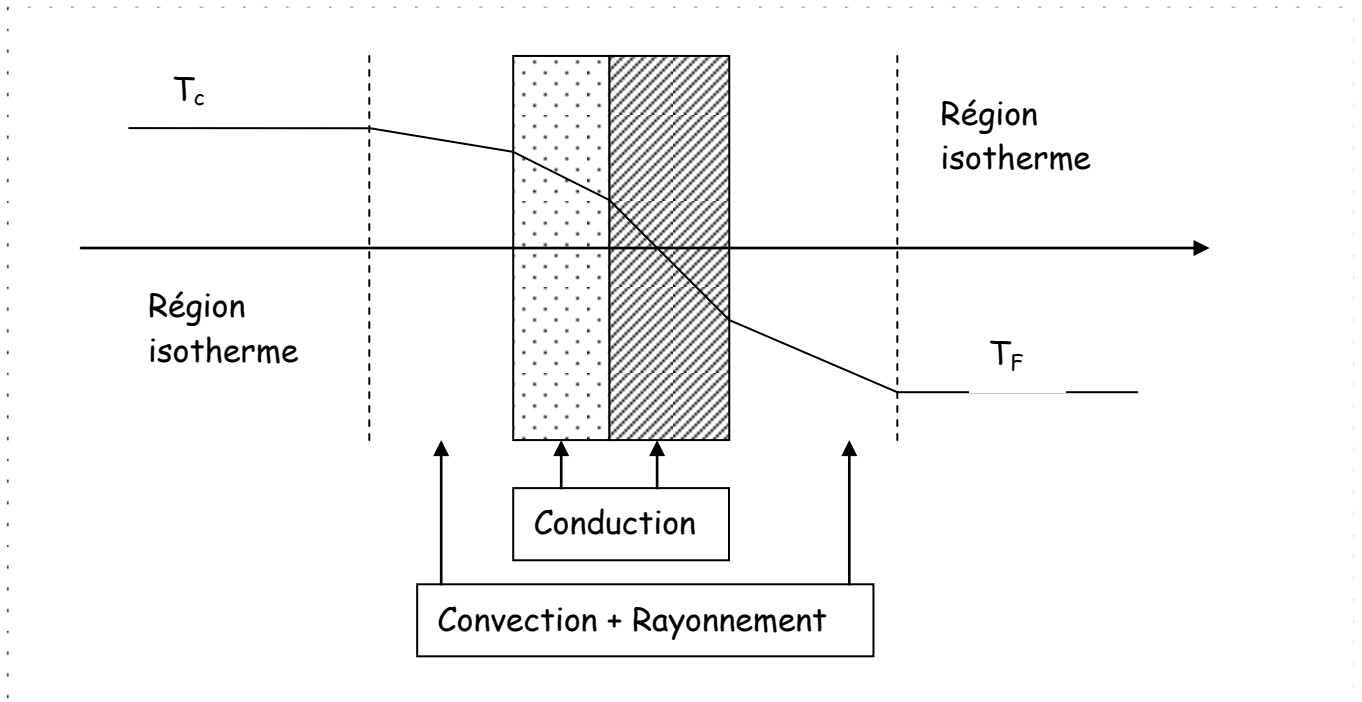
global d'échange.

Nota : Dans l'étude d'un bilan thermique sur une habitation, les professionnels utilisent  $h_g$  et ne se soucient pas des mécanismes séparés. Cette valeur de  $h_g$  est très difficile à évaluer, on prend suivant les régions une valeur moyenne sur l'année. La convection et le rayonnement permettent d'interpréter par exemple la variation de température constatée entre le centre d'une pièce et la face de la paroi au

contact de l'air de cette pièce.

### VIII. ANALYSE COMPLETE D'UNE PAROI

Régime stationnaire, il n'y a pas d'énergie stockée,  $\varphi$  est le même dans tout les milieux.

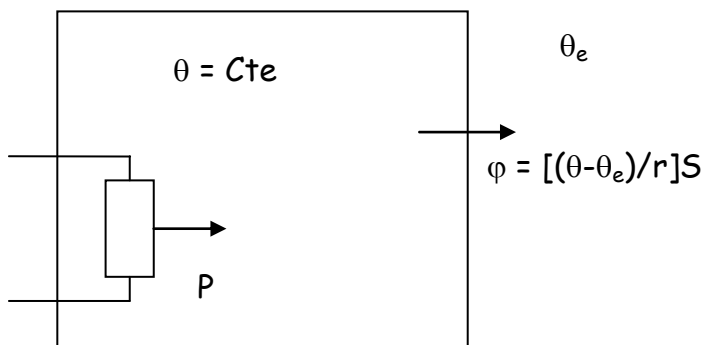


On obtient une résistance totale 
$$r = \frac{1}{h_g} + \sum_i \left( \frac{e_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{h_g'}$$

La connaissance de  $r$  permet pour une différence de température  $T_c - T_f$  de connaître  $\varphi$  et la répartition des températures.

On peut maintenant étudier les déperditions thermiques à travers une paroi.

Il est possible en régime permanent de réaliser le bilan thermique d'une enceinte (maintenir une température constante dans celle-ci) puisque dans ce cas la puissance thermique  $P$  apportée compense les pertes.



On souhaite  $\theta$  dans la pièce alors que l'extérieur est à  $\theta_e$ . Les parois sont identifiées ainsi que les  $h_g$  d'où  $r$ . La surface de passage est  $S$ . On a  $P = [(\theta - \theta_e) / r] S$

#### Exercices

- mur classique.
- Simple et double vitrage.

# Energie interne ; température. Capacité thermique massique

## I. MESURE DES TEMPERATURES

### 1. la pyrométrie

mesure des températures sans contact. La température est déduite d'une mesure d'une fraction du flux de chaleur par un détecteur. Les lois du rayonnement interviennent dans la détermination de T.

### 2. Détecteurs de mesure avec contact

#### a. Dilatation des liquides

thermomètres classiques

#### b. Résistance

$R(\theta) = R_0(1 + a.\theta)$ , la mesure de  $R(\theta)$  permet via la relation de déterminer la température  $\theta$ .  $R_0$  valeur de la résistance à  $0^\circ\text{C}$ .

#### c. Thermistance

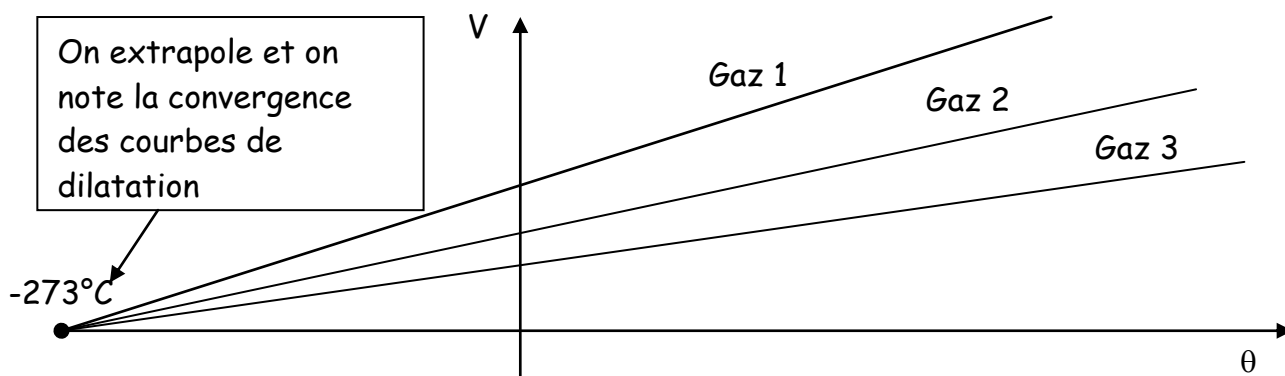
les thermistances sont constituées à partir de matériaux semi conducteurs, la résistance de la thermistance dépend de la température T :  $R(T) = a.e^{b/T}$ . la mesure de  $R(\theta)$  permet via la relation de déterminer la température  $\theta$ .

#### d. Thermocouple

on utilise un couple de métaux. Soit le circuit constitué par 2 fils homogènes de nature différentes A et B soudés à leurs extrémités en S et S'. Si l'on porte les jonctions S et S' à des températures différentes on constate que ce circuit est le siège d'une tension u directement relié à la différence de température  $\theta - \theta'$ , la mesure de u via la relation  $u(\theta - \theta')$  permet de déterminer  $\theta$ ,  $\theta'$  étant connue par exemple c'est la température ambiante.

### 3. Echelles des températures

Etude du volume d'un gaz parfait (faible pression) en fonction de la température. (on peut faire une manip simple sur l'étude de la dilatation d'un gaz en fonction de  $\theta$  à pression constante).

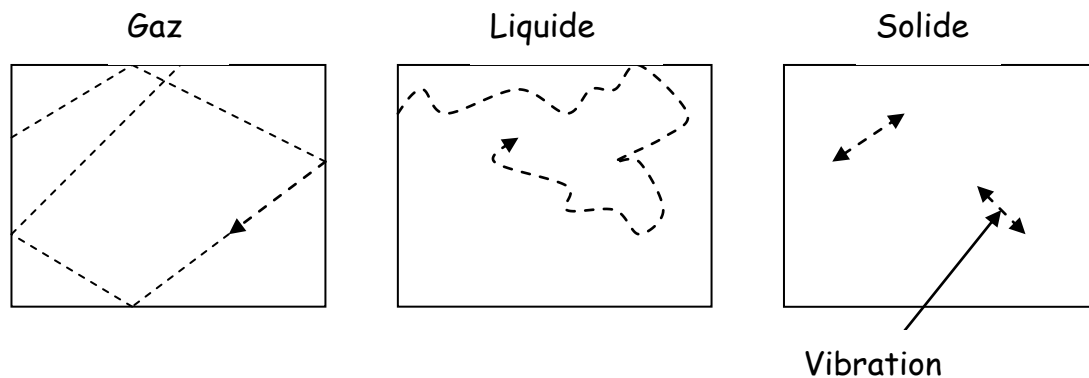


-273°C apparaît comme une température absolue au-delà si le gaz reste parfait le volume serait négatif !!! En posant  $T = \theta + 273$  (unité : Kelvin, K) on obtient une grandeur physique toujours positive permettant de mesurer l'agitation thermique, d'autre part on obtient une expression simple du volume  $V = a.T$

## II. AGITATION INTERNE

Les éléments constituant un système ont un mouvement aléatoire, ils possèdent une vitesse moyenne de déplacement. La température  $T$  exprimée en kelvin est une mesure de cette vitesse moyenne qui nous renseigne en quelque sorte sur le désordre ou l'agitation de notre système. L'augmentation de  $\theta$  correspond à une augmentation de cette vitesse et donc à une augmentation de l'énergie de notre système appelé énergie interne.

### Exemple de mouvement d'une particule

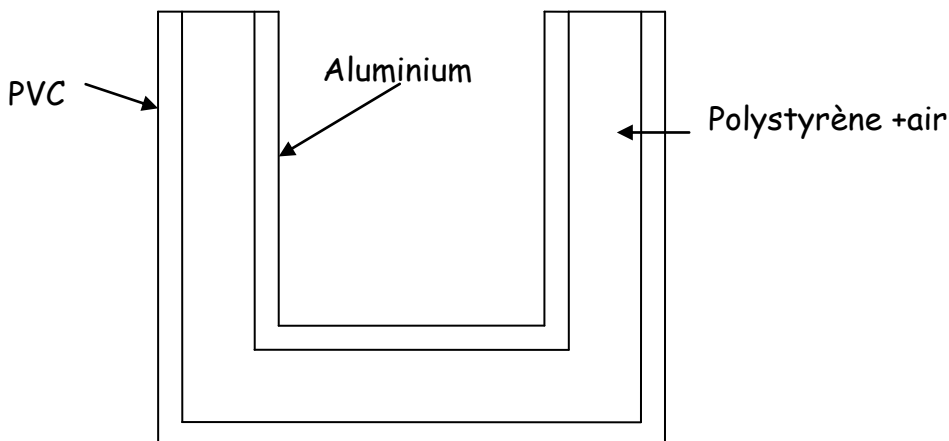


L'augmentation de température d'un corps (système) montre que celui-ci a reçu de l'énergie du milieu extérieur. L'énergie nécessaire pour élever de  $1^\circ\text{C}$  ou  $1\text{K}$  une masse de  $1\text{ Kg}$  d'un corps solide ou liquide est appelé capacité thermique massique :

$C$  en  $\text{J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$

Corps purs ,exemple :  $C_{\text{eau}} = 4180 \text{ J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$ ,  $C_{\text{cuivre}} = 400 \text{ J.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$

Corps composés, exemple paroi d'un calorimètre



Expérimentalement on sera capable de déterminer la capacité thermique globale  $C$  en  $\text{J.K}$  c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour élever la température de  $1^\circ\text{C}$  ou de  $1\text{K}$  de la paroi du calorimètre, il n'est pas nécessaire de faire une étude portant sur chaque matériaux composant la paroi. A noter que la constitution de la paroi est telle que sa résistance thermique est grande et que l'on pourra négliger le flux thermique traversant cette paroi on dit que la paroi est adiabatique ou encore imperméable à la chaleur. On comprend que lorsque l'on chauffe l'air d'une pièce, les éléments constituant la pièce

ainsi que les parois vont absorber une partie de l'énergie apportée (en dehors des pertes) la connaissance de la capacité thermique de la pièce ainsi que la résistance thermique des parois va permettre d'interpréter l'évolution de la température. La capacité thermique d'un bâtiment sera par exemple obtenue en étudiant le refroidissement de celui-ci.

Exercices sur le calorimètre qui pourront illustrer les situations de TP

## Transfert de chaleur par rayonnement

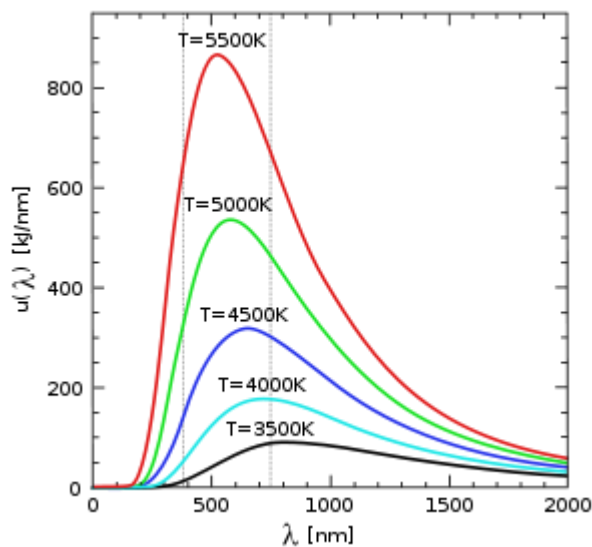
Un corps peut émettre ou absorber de l'énergie sous forme de rayonnement ce qui a pour effet de modifier son énergie interne et donc sa température.

### CARACTERISTIQUE DU RAYONNEMENT

Une radiation EM est caractérisé par sa fréquence  $f$ , ou par sa longueur d'onde  $\lambda$  :  $\lambda = \frac{C}{f}$ ,

avec  $C$  vitesse de la lumière, une telle radiation est dite monochromatique.

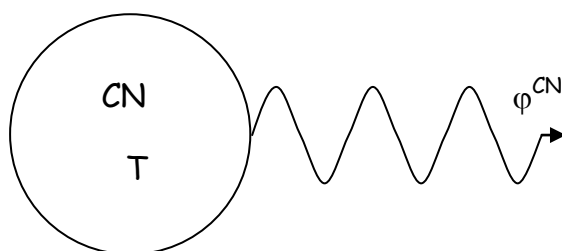
La mesure de l'énergie des différentes radiations émises montre qu'elle n'est pas uniforme pour un corps à une température donnée.



La courbe à 5500 K correspond à l'émission du soleil, les lampes d'éclairages devraient avoir dans le cas idéal lorsqu'elles fonctionnent un spectre proche de celui-ci, dans le domaine du visible : 400 nm → 800 nm

Un corps idéal qui absorberait la totalité du rayonnement est appelé corps noir (référence) par analogie avec ce qui se passe dans le domaine des longueurs d'onde du visible. Le corps noir à une température  $T$  émet un rayonnement dont la loi est parfaitement connue (expérience et théorie).

Loi de Stéphan-Boltzmann :  $\varphi^{CN} = \sigma.T^4$  avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$



A l'équilibre la température  $T$  est constante donc le flux rayonné est égal au flux apporté.

Pour les corps usuels le rayonnement émis  $\varphi < \varphi^{CN}$  on parle de corps gris, le rapport

$\frac{\varphi}{\varphi^{CN}} = \varepsilon$  est appelé émissivité du corps, ce nombre est compris entre 0 et 1

$\varepsilon \ll 1$  on parle de corps brillant

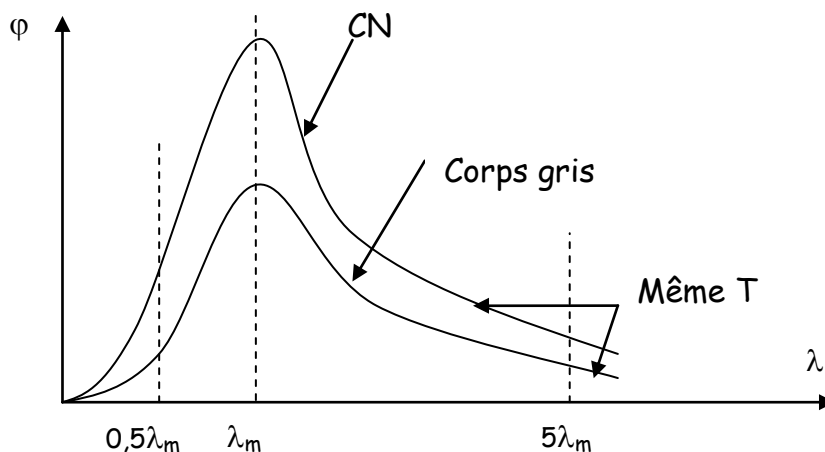
quelques valeurs d'émissivités à 38°C

Aluminium poli : 0,04

Acier inox poli : 0.15

Peinture sombre et mate : 0.9

retour sur le spectre d'énergie du rayonnement



Le flux maximum est obtenu pour une longueur d'onde que l'on sait déterminer

simplement avec la relation :  $\lambda_m = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}$ .

90 % du flux total transporté par le rayonnement est compris entre  $0,5 \cdot \lambda_m$  et  $5 \cdot \lambda_m$

Nota : les contraintes imposées à une lampe d'éclairage sont :

un spectre calé sur le domaine du visible et une consommation faible.

Si on fait des calculs avec les infos ci-dessus pour une lampe à incandescence on voit que inévitablement on produit du rayonnement en dehors du visible qui consomme de l'énergie. Il faut donc se tourner vers d'autres types de production de la lumière, par exemple la décharge des gaz. Allez chercher documents sur les spectres des lampes basses énergies.

Remarques : Un corps de couleur noire absorbe tout le rayonnement du visible mais n'est pas pour autant un CN, il peut ne pas absorber dans l'IR et dans l'UV .

Un corps de couleur rouge absorbe toutes les radiations incidentes dans le visible sauf le rouge, cela ne veut pas dire qu'il émet dans le rouge puisque la nuit il n'est pas visible, la couleur dépend de la lumière incidente. Eclairé en bleu ce corps paraîtra noir.

Notion de confort thermique.

L'air d'une pièce peut être rapidement chauffé, mais les constituants de la pièce et



de la paroi vont mettre un temps beaucoup plus long pour atteindre une  $\theta$  « confortable » (inertie thermique). Dans ce cas une personne placée dans cette pièce pourra avoir une sensation de froid, il va y avoir un échange par rayonnement entre elle, les constituants et la paroi dont le bilan sera négatif pour la personne, d'où la sensation de froid.