#### Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme

Cours Physique du Bâtiment- 1ère année 2009/2010





Partie 3: Thermique du Bâtiment

Chédly Souga Professeur à l'ENAU

# Chapitre 1

# Les lois fondamentales de la thermique du bâtiment

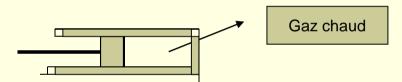
# 1-1 Chaleur et transmission thermique

- Dans le langage courant, les mots chaleur et température ont souvent un sens équivalent :
   « Quelle chaleur »! est une expression qui veut dire que la température est élevée.
- Toutefois, en physique, chaleur et température sont deux notions bien différentes. Lorsqu'on "chauffe" un mélange d'eau et de glace, la température n'évolue pas tant que les deux états de l'eau coexistent. Inversement on peut élever la température d'un système sans apporter de "chaleur", à l'aide d'un travail mécanique (cas de l'échauffement de la pompe à vélo)

## 1-1-1: Notion de chaleur

La chaleur est une forme d'énergie; en effet un gaz emprisonné dans le cylindre clos d'un piston se dilate et déplace le piston: il produit don un travail.

L'inverse peut se produire également; en effet deux frottés l'un contre l'autre dégagent de la chaleur.



La chaleur est une énergie thermique mesurable avec la même unité que le travail mécanique.

Dans le système d'unités fondamentales du SI (MKSA), le travail [w] = [F] [L]= kgm²s⁻² =Joule (J). Par consequent la chaleur se mesure en joule: [Q]=J .On utilise encore l'unité industrielle qui est le Kcal, soit

 $1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal} = 4185 \text{ Joules}$ 

# 1-1-2 Notion de température

- La température est la manifestation mesurable de la quantité de chaleur introduite. Elle est étroitement liée à l'énergie cinétique d'agitation ou énergie thermique.
- La thermodynamique fournit une relation directe entre la température (grandeur macroscopique) et l'énergie cinétique d'agitation moyenne des molécules (grandeur microscopique). Soit Ec l'énergie cinétique et T la température, alors on a,

Ec = 
$$3/2$$
 kT où k =  $1,38$  10 <sup>-23</sup> J/ K est la constante de Boltzmann

L'unité employée dans le SI est le degré Kelvin (代). Le degré Celsius (℃) reste le plus employé dans la vie courante.

T(K) = T(C) + 273 . Les anglais emploient encore le degré Fahrenheit. La relation avec le degré Celsius est,

$$T(\mathfrak{T}) = 9/5 T(\mathfrak{C}) + 32$$

# 1-1-3 Capacité thermique massique et Chaleur latente

- Lorsque de la chaleur est transmise (ou extraite) à un corps, sa température augmente (ou diminue). Une relation mathématique simple entre la chaleur Q et la température T traduit le processus de réchauffement (ou de refroidissement).
- Ce réchauffement (ou refroidissement) se poursuit jusqu'à atteindre une valeur limite pour laquelle le corps commence à subir des transformations. On dit alors <u>qu'il a subi un changement d'état</u>. Au cours des processus de changement d'état, la température des corps reste constante. La transformation est dite isotherme. Toute la chaleur consommée est utilisée pour modifier l'état du corps.

# 1-1-3-1 Echauffement ou refroidissement d'un corps

La relation fondamentale entre la chaleur transférée et la variation de température d'un corps est donnée par la relation

$$\Delta Q = m.C. \Delta T.$$
 (1)

- C est la chaleur massique ou capacité thermique massique. Elle se définit comme la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance. Son unité est, d'après la relation précédente le J/kg/C ou encore le kcal/kg/C. C est une propriété physique spécifique des corps, elle se mesure expérimentalement. On la trouve dans la littérature sous forme de tableaux.
- Deux catégories de chaleur spécifique sont données. Celle à pression constante Cp et celle a volume constant Cv. La première Cp est la plus fréquemment utilisée.
- La relation (1) au dessus suppose une variation linéaire de la température en fonction de la chaleur. Dans la réalité les dépendances sont plus compliquées car **C** dépend elle-même de la température. On peut cependant, dans de nombreux cas, considérer que **C** est constante car les variations sont négligeables. On choisit, pour cela, la valeur moyenne de **C** sur un faible intervalle de température, ce qui est une approximation raisonnable.

# Capacité thermique massique de différentes substances, à pression constante, dans les <u>conditions normales de température et de pression</u>

Substance	Phase	C (J/kg/℃)		
Air (sec)	Gaz	1005		
Air (saturé en vapeur d'eau)	Gaz	1030		
<u>Aluminium</u>	Solide	900		
Azote	Gaz	1040		
Cuivre	solide	385		
Diamant	solide	502		
Eau	Gaz	1850		
	Liquide	4186		
	solide	2060		
Ethanol	liquide	2460		
Fer	solide	444		
Hydrogène	Gaz	14300		
Or	solide	129		
Oxygène	gaz	920		

# 1-1-3-2 Changement d'état

- Nous ne considérons ici que les changements d'états liés aux transitions de phase. On trouve d'autres changements d'état tels que: les changements des propriétés mécaniques, chimiques, magnétiques ou encore électriques des corps. Aussi les phénomènes de dilatation et compression.
- Les transitions de phases font référence au passage, d'un état physique d'un corps pur à un autre de ces états. Les plus connus sont:

Fusion: passage de l'état solide à l'état liquide # Solidification (congélation)

Vaporisation: passage de l'état liquide à l'état gazeux # Liquéfaction (condensation)

Sublimation : passage de l'état solide à l'état gazeux .

La relation donnant la quantité de chaleur consommée pour réaliser ces transitions est:

#### $\Delta Q = mL.$ (2)

L est la chaleur latente, elle s'exprime en J/kg ou encore en kcal/kg. C'est une propriété du corps, elle se mesure expérimentalement et présentée sous formes d'abaques ou tables.

L'équation 2 indique que <u>la transformation se fait de façon isotherme</u>. En effet, la température n'apparaît pas dans cette relation. On donne ici, à titre d'exemple, le diagramme des transitions pour l'eau.

# 1-1-3-2 Changement d'état(suite)

On peut dire que la chaleur latente traduit l'inertie, la « récalcitrance » d'un corps à modifier son état de phase: pour élever sa température il faut d'abord s'assurer qu'il ne va pas changer de phase; s'il change de phase pendant l'augmentation de température, alors une énergie supplémentaire doit être fournir pour franchir la « barrière ». Le changement de phase nécessite un apport d'énergie(ou retrait d'énergie selon le sens de la transformation).

Il faut également comprendre que la chaleur que nécessite un changement de phase est très élevées par rapport aux chaleurs d'échauffement ou de refroidissement. Par exemple, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est

L<sub>v</sub> = 540 kcal/kg, alors que la chaleur nécessaire pour élever la température d'un kg d'eau de 100℃ est de Q= 100 kcal, soit plus que 5 fois supérieure.

# **Exemple de transition de phase:** Le diagramme de transformation de l'eau dans les conditions normales de pression et de température

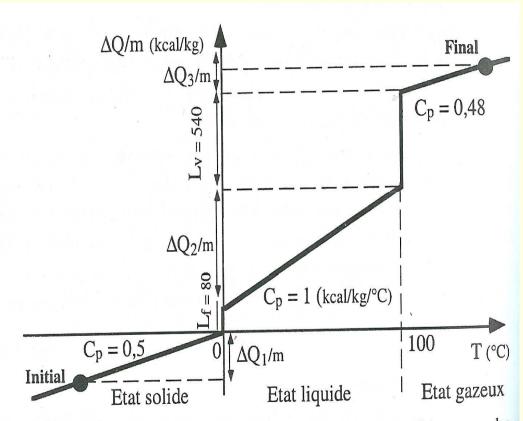


Figure III.5 Diagramme des transformations de l'eau dans les conditions normales de température et de pression.

Chédly souga/professeur ENAU

Dans une expérience réalisée dans les conditions normales de pression et de température, on transforme un cube de glace de 50 g à -10°C, en vapeur d'eau à 145°C. On donne ci-contre, le diagramme des transformations de l'eau dans les mêmes conditions.

Evaluer la quantité de chaleur totale (en kcal), nécessaire pour accomplir cette transformation.

# 1-2 Humidité et phénomènes de condensation

- L'humidité de l'air constitue un facteur de confort pour l'occupant et la source de nombreux problèmes pathologiques dans le bâtiment à cause de la condensation qu'elle engendre. L'eau de condensation provoque une diminution des performances de l'enveloppe(dégradation des matériaux, augmentation de la conductivité thermique, gel, etc..)
- Il n'existe pas de solution unique pour l'ensemble des problèmes. Chaque cas rencontré doit être traité séparément. On peut cependant, en connaissant les processus physiques à l'origine de ces problèmes, trouver plus facilement les solutions appropriées. On a besoin, pour cela, de connaître certaines définitions, comme l'humidité relative, la saturation ou le point de rosé.. On a également besoin de connaître la définition de la perméabilité des parois pour mieux comprendre comment la vapeur d'eau les traverse.

#### 1-2-1 L'air humide

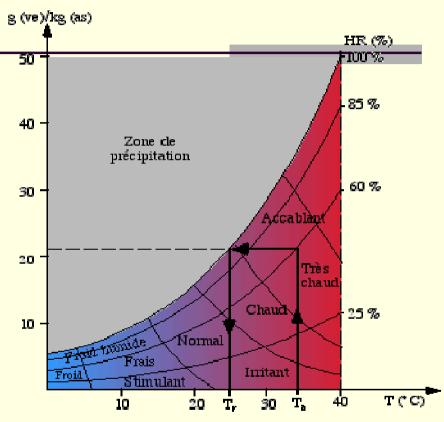
- L'air sec, à l'état pur, est un mélange des gaz parfait suivants : Oxygène (O2), Azote (N2), Argon (Ar), Anhydride carbonique (CO2), et d'autres gaz rares.
- L'air sec, en tant que mélange de gaz parfaits est régi par la loi de Dalton qui stipule que la pression du mélange est la somme des pressions partielles de chaque gaz.
- L'air humide est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. Ce mélange est aussi considéré comme un mélange de deux gaz parfaits. La pression totale de l'air humide est donc composée des pressions partielles de la vapeur d'eau et de l'air sec.

#### Composition de l'air sec à l'état pur

Gaz parfait	Volume (%)		
Oxygène	20,99		
Azote	78,03		
Argon	0,94		
CO2	0,03		
Gaz rares	0,01		

#### 1-2-2 La saturation

- À une température T donnée, la proportion de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air, ne peut dépasser un poids maximum appelé **poids de vapeur saturante** ou limite de saturation (<u>Diagramme de Mollier</u>). Elle se mesure en gramme de vapeur d'eau par kg d'air sec (g/kg). Cette quantité maximale exerce une pression maxi partielle appelée Ps= Pression de saturation.
- Au-delà de cette quantité, l'excès de vapeur d'eau se transforme en eau ou se condense: (Analogie avec dissolution du sucre dans l'eau)
- Plus l'air est chaud et plus sa capacité à emmagasiner de la vapeur d'eau est grande. Autrement dit, la limite de saturation est d'autant plus grande que l'air est chaud.



Le diagramme de Mollier permet de déterminer la teneur en eau de l'air et sa température de rosée. Comment procéder pour cela ?

Considérons l'ambiance à Ta = 34 C et avec une HR de 60 % indiquée sur le diagramme. Alors cet air contient 21g de vapeur d'eau par kg d'air sec. La température de rosée est égale à la température où cette teneur correspond à la saturation. Donc il suffit de projeter cette ambiance sur la courbe de saturation parallèlement à l'axe des températures pour déterminer le point de rosée. Tr = 25 C.

## 1-2-3 Propriétés de l'air humide

#### L'humidité absolue ; W

dénote la teneur en eau de l'air humide, elle correspond au ratio de la masse de vapeur d'eau sur la masse totale de l'air humide. L'humidité absolue est exprimée en [kg d'eau par kg d'air sec] et peut être déterminée à partir de l'expression suivante :

$$W = 0.622 \frac{P_s}{P_t - P_s}$$

Ps= pression de saturation

Pt=pression totale de l'air humide

#### L'humidité relative:Hr

Dans la plus part des cas, l'air n'est pas saturé de vapeur d'eau et contient un certain pourcentage de la quantité maximale possible.La pression partielle exercée s'appelle:  $P_{\text{eff}}$  = pression effective. Le rapport HR (%) exprime donc l'humidité relative de l'air  $HR = 100 \frac{Peff}{P}$ 

A la température et à la pression de l'air humide, HR correspond au ratio de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide et la quantité de vapeur d'eau que cet air contiendrait à la même température, mais à saturation.

#### 1-2-4 Point de rosée et formation d'humidité

Le point de rosée correspond à la température à partir de laquelle l'air ambiant se condense. Considérons un volume V d'air défini par une température Ta et un taux d'humidité relative HR. Si on abaisse sa température (sans modifier la quantité de vapeur d'eau), la limite de saturation diminue et donc son humidité relative augmente. Si on poursuit l'opération jusqu'à atteindre la limite de saturation. La température correspondante est appelée point de rosée Tr.

# Chapitre 2

Les Modes de Transfert de Chaleur dans le Bâtiment

# 2-1 Transfert thermique dans le bâtiment

- Dans les bâtiments, le transfert de chaleur qui est lié à une différence de température entre deux milieux se produit de trois manières: La conduction, la convection et le rayonnement. Chacun de ces modes est lié à un processus physique bien déterminé. En effet, l'énergie thermique d'un corps correspond à l'énergie cinétique de ses constituants(atomes, molécules, ions,etc..). Ces derniers peuvent échanger tout ou partie de leur énergie cinétique, ç-a-d gagner ou perdre de l'énergie thermique.
- Par ailleurs, le maintien à une valeur déterminée de la température à l'intérieur d'un bâtiment suppose que son bilan thermique est nul. Ceci veut dire par exemple que la somme des apports thermiques doit compenser en hiver les déperditions vers l'extérieur du bâtiment.

#### 1-3-1 La conduction

- C'est un transfert de chaleur entre deux corps en contact de températures différentes, ou entre deux parties d'un même corps soumis à un gradient de température.
- L'échange se fait de particule à particule grâce à des collisions entre les particules agitées et celles au repos. L'évolution de proche en proche de ces processus microscopiques apparaît comme un écoulement de chaleur des points les plus chauds vers les points les plus froids, tendant à l'homogénéisation des températures entre les deux corps.

#### Loi de Fourier:

Dans une direction (ox) donnée, la densité de flux de chaleur  $\phi(x)$  en un point M(x) est proportionnelle au gradient de température en ce point dT/dx. La constante de proportionnalité est une caractéristique typique du matériau et s'appelle conductivité thermique:

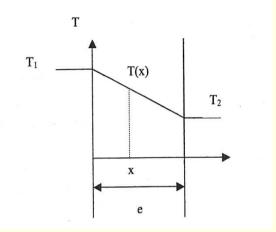
$$\varphi(x) = -\lambda dT/dx$$
 (3)  
 $[\varphi(x)] = w/m^2$  et  $[\lambda] = w/m^{\circ}$ 

### 1-3-1-1 Conduction de la chaleur en régime permanent

- Si l'on impose aux deux extrémités d'un corps conducteur des températures constantes T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>, il s'établit au bout d'un certain temps un flux de chaleur indépendant du temps. Les températures ne varient plus: <u>C'est le régime</u> permanent.
- Au cours de ce régime, la matière ne stocke plus de chaleur, le flux est constant de l'extrémité chaude jusqu'à l'extrémité froide: Il est conservé φ(x) = φ= cte

On suppose que  $T_1 > T_2$ 

e=épaisseur du matériau



 La résolution de l'équation de la chaleur précédente(3)

donne: 
$$T(x) = T_1 - (T_1 - T_2).x$$

$$\frac{\mathbf{\Phi} = \mathbf{\lambda}}{\mathbf{e}} (\mathsf{T}_1 - \mathsf{T}_2).$$

# 1-3-1-2 Conductivité thermique et pouvoir isolant des matériaux

Le coefficient λ(w/m°C) qui intervient dans la loi de Fourrier décrit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Il est élevé pour les matériaux conducteurs et faible pour les isolants. On ales ordres de grandeurs suivants:

 $\begin{array}{lll} \text{M\'etaux} & \lambda > 5 \\ \text{Mat\'eriau conducteurs} & 0,6 < \lambda < 5 \\ \text{Mat\'eriaux isolants} & 0,2 < \lambda < 6 \\ \text{Tr\`es bon isolants(air, polystyr\`ene} & \lambda < 0,2 \\ \end{array}$ 

- Le meilleur isolant est l'air immobile ( $\lambda = 0.024 \text{ w/m}^{\circ}$ C), aussi la plus part des matériaux isolants sont constitués d'alvéoles d'air ou de structures en fibre.
- La conductivité thermique varie en fonction de la température du corps. Cépendant lorsque les écarts de température ne sont pas très élevés, on peut considérer avec une bonne précision que λ= cte.
- La résistance thermique d'une lame d'air d'épaisseur inférieure à 5cm est Ra=0,16 m²C/w. Cette valeur est calculée en fonction de la conductivité de l'air , mais également en tenant compte de la convection et du rayonnement à l'intérieure de la lame.
- L'isolation d'une paroi permet de:
  - réduire les déperditions de chaleur en hivers et la pénétration de la chaleur en été.
  - compenser la réduction de l'épaisseur totale des parois dans les techniques de constructions modernes.
  - éviter la condensation à l'intérieur et à la surface des parois, grâce au maintient de températures pas trop basses.
  - éviter la sensation de froid(en hiver) ou la sensation de chaud (en été) que l'on éprove au voisinage d'une paroi, à cause des échanges radiatifs.

Le pouvoir isolant d'une paroi est bien décrit par sa résistance thermique **R** ou son coefficient de transfert **K** 

### 1-3-1-2 Résistance thermique

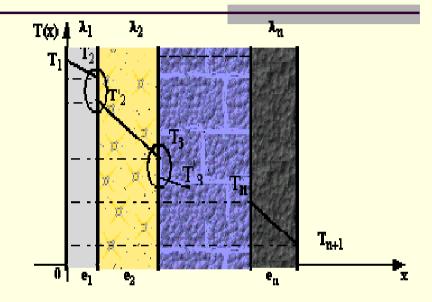
- La résistance thermique est la faculté d'un corps à s'opposer à la propagation de la chaleur lors de sa traversée. Plus un corps est résistant, et plus la quantité de chaleur qui le traverse est faible.
- Afin d'établir son expression, on procède par analogie avec l'électricité. En effet, on sait que lorsqu'il apparaît une différence de potentiel ΔV dans un conducteur alors un courant s'installe. Ce courant n'est autre qu'un flux de charges électriques à travers une section droite du conducteur. La relation liant ces deux grandeurs est la loi d'Ohm:
- I= ΔV/Re où Re = I/γs est la résistance électrique du tronçon parcouru par le courant, γ est la conductivité électrique du conducteur.

- De la même façon qu'en électricité, lorsqu'il apparaît une différence de température entre deux partie d'un corps, un flux de chaleur s'établit.
- Une relation analogue à la loi d'Ohm peut être construite à partir de la <u>loi</u> de Fourier,
- Φ =  $\Delta$ T/Rth avec Rth = e/ $\lambda$ S où Rth est la résistance thermique et  $\lambda$  le coefficient de conductivité thermique.
- Vu que les thermiciens utilisent la densité de flux φ plutôt que le flux Φ, on utilisera plutôt la résistance thermique associée à la densité de flux. Il suffit pour cela de définir une résistance par unité de surface. On a alors
- Rth =  $e/\lambda$

$$[\mathbf{R}_{th}] = m^2 \mathbf{C} / \mathbf{w}$$

### 1-3-1-3 Résistance thermique équivalente d'une paroi multicouches

- On se propose maintenant de regarder ce qu'il se passe lorsque la paroi est composée de plusieurs couches homogènes, parallèles et à faces isothermes, parfaitement accolées. C'est une configuration très fréquemment rencontrée dans les ouvrages d'un bâtiment
- Les données du problème, pour la paroi dessinée sur la figure ci contre sont les températures sur les deux faces de la paroi T<sub>1</sub> et T<sub>n+1</sub>, les coefficients de conductivité  $\lambda$  et les épaisseurs ei de chacune des couches. Les inconnues sont les températures intermédiaires  $T_2T_3,...,T_n$ .

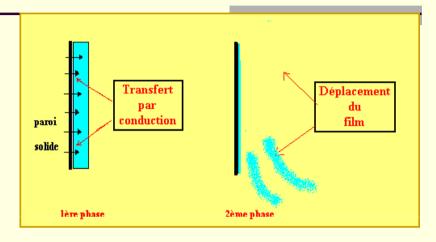


En appliquant l'analogie électrique, on voit qu'on est en situation d'une association des résistances en série. On a par conséquent  $R_t = \sum R_i = \sum e_i / \lambda_i$ 

Le flux de chaleur conductif à travers une surface S de cette Chédly souga/professeur ENAU paroi est:  $\Phi = S$ .  $(T_1 - T_{n+1})/R_t$ 

#### 1-3-2 La convection

- Le transfert convectif intervient dans les échanges thermiques entre une paroi et un fluide(gaz ou liquide) en mouvement, en contact avec cette paroi.
- le transfert s'effectue en deux temps (ici on prend Tp > Tf) :
  - <u>1ère phase</u>: échange de chaleur par conduction entre les molécules de la surface de la paroi et celles du "film" (mince couche de fluide au voisinage de la surface)----><u>échange par conduction paroi-film.</u>
  - <u>2ème phase</u> : les molécules du film se déplacent en emportant la chaleur transférée au niveau du film ---> échange par déplacement de fluide.



Dans le bâtiment, c'est essentiellement l'air en mouvement qui joue ce rôle. On distingue:

- -<u>La convection naturelle:le</u> mouvement de l'air résulte de la différence de densité des parties chaudes et froides du fluide. Exp:Le mouvement de l'air au voisinage d'un radiateur
- -La convection forcée: Le mouvement du fluide est produit par un système mécanique extérieur. Exp: pompe,

### 1-3-2-1 Loi générale de la convection: Loi de Newton

Dans la convection, le flux de chaleur est associé à la variation de température par la loi de Newton. Cette loi simplifiée est analogue à la loi de Fourier pour la conduction. Elle s'écrit,

#### $\Phi = h_c.S.\Delta T$ où:

 $h_c$  = coefficient d'échange convectif sur la surface  $[h_c]=w/m^2$ °C.

S= surface de contact entre la paroi et le fluidal (m²)

 $\Delta T$  = différence de température entre la paroi et le fuide.

#### Résistance thermique

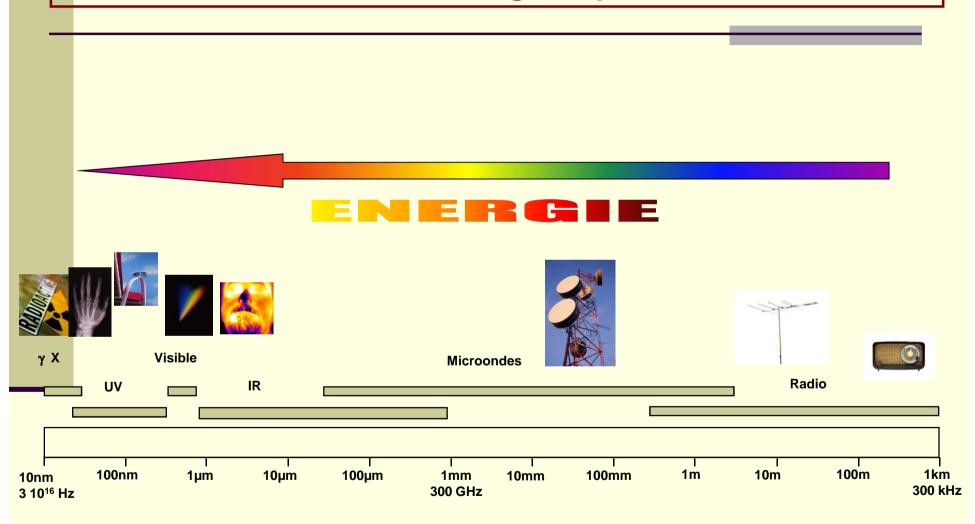
On établit l'expression de la résistance par une démarche analogue à celle faite pour la conduction. On trouve alors, pour une surface d'échange donnée S, la relation suivante

- Le coefficient d'échange h<sub>c</sub> est très difficile à déterminer, compte tenu de la complexité des phénomènes physiques qui interviennent.
- En convection forcée, h<sub>c</sub> dépend notamment de la vitesse Exp: vent sur les parois extérieures d'un bâtiment
- En convection naturelle, le coefficient h<sub>c</sub> dépend notamment de l'inclinaison de la paroi et de la direction du flux transféré:Exp:
- h<sub>c</sub> ≈ 4 pour une paroi verticale et flux horizontal

**h**<sub>c</sub> ≈ 3 pour une paroi horizontale et flux descendant.

 $h_c \approx 6$  pour une paroi horizontale et flux ascendant.

# 1-3-3 Le rayonnement : Spectre du rayonnement Electromagnétique



## 1-3-3 Le rayonnement

- Tous les corps émettent un rayonnement de nature électromagnétique lié à leur propre température: C'est le rayonnement thermique. Cette émission d'énergie est, identique à un flux de chaleur. Ce rayonnement est en général *polychromatique*, c'est à dire que le spectre d'émission est composé de plusieurs longueurs d'ondes. Ce spectre s'étend de l'*infrarouge* à l'*ultraviolet*, *entre 0.1 et 100 μ*.
- Le spectre visible compris entre 0.4 et 0.8 μ fait partie du rayonnement thermique.
- Plus la température d'un corps est élevée et plus les fréquences associées à son rayonnement sont élevées. Le bleu de la flamme est plus chaud que le rouge.
- Il s'agit d' un transfert de rayonnement électromagnétique entre deux cors par émission ou par absorption.
- Comme le rayonnement e.m n'exige pas de support matériel pour se propager, il représente le seul mode d'échange d'énergie entre deux corps distants placés dans le vide. Exp le rayonnement solaire

# Bases de la thermographie

Une caméra de thermographie infrarouge est donc un appareil qui capte un rayonnement invisible et le restitue sous forme d'une image visible colorisée.







# 1-3-3-1 Réception du rayonnement sur une paroi

 Considérons un rayonnement incident sur une paroi partiellement transparente. Le flux incident Φ<sub>i</sub> se divise en trois parties:

 $\begin{array}{l} \Phi_{\alpha} \text{ le } \textit{flux absorbé} \;, \\ \Phi_{r} \text{ le } \textit{flux réfléchi} \text{ et} \\ \Phi_{t} \text{ le flux transmis. Alors on a} \end{array}$ 

$$\Phi_{\mathsf{i}} = \Phi_{\mathsf{r}} + \Phi_{\alpha} + \Phi_{\mathsf{t}}$$
.

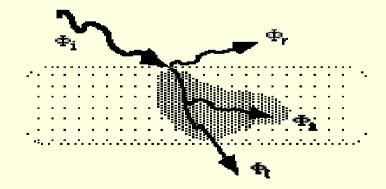
On définit le facteur de réflexion  $\rho$  =  $\Phi_{\text{r}}/\Phi_{\text{i}}$  le facteur d'absorption  $\alpha$  =  $\Phi_{\text{a}}/\Phi_{\text{i}}$  le facteur de transmission  $\tau = \Phi_{\text{t}}/\Phi_{\text{i}}$  Le bilan d'énergie s'écrit cette fois-ci,

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

Pour les corps opaque(solides et liquides qui arrêtent le rayonnement dès la limite de leurs surfaces), une grade parie du rayonnement est réfléchie, l'autre est absorbée.On a:

$$\tau = 0$$
 et  $\rho + \alpha = 1$ 

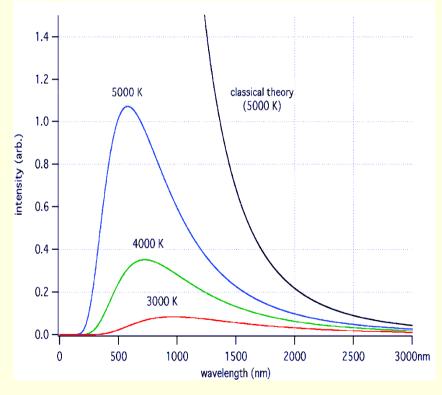
p et α représentent dans ce cas des propriétés de la surface de la paroi(et non du matériau qui le compose. Seul le rayonnement absorbé conduit à l'échauffement du matériau



#### 1-3-3-2 Emission du rayonnement

- Du point de vue de l'émission, les corps opaques rayonnent par leur seule surface contrairement aux corps transparents qui rayonnent par tout leur volume. On définit l'émittance énergétique « M » comme étant le flux rayonné par unité de surface du corps. L'émittance a donc la dimension d'une densité de flux. M= dΦ/ds [M] =w/m² On distingue deux catégories de corps opaques. Ceux qui se comportent comme le corps noir et ceux qui se comportent comme les corps gris.
- Le corps noir est, par définition, le corps opaque qui absorbe tout le rayonnement incident. C'est également celui qui, à une température T donnée, émet le maximum d'énergie. Il sert de référence(d'étalon) pour définir les propriétés thermiques associées au rayonnement des autres types de corps.

Pour caractériser le spectre d'émission d'un corps (ou de toute autre source), on peut tracer l'intensité émise pour chaque longueur d'onde. En répétant l'expérience avec un matériau à différentes températures, on obtient alors un graphe à l'allure suivante (ignorer la courbe noire) :



La <u>loi de Planck</u> décrit la distribution spectrale du rayonnement électromagnétique d'un corps noir :

$$W\lambda_{CN} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1\right)} x 10^{-6} \left[Watts/m^2 \mu m\right]$$

Excitance spectrique d'un corps noir à la longueur d'onde

c = vitesse de la lumière =  $3 \times 10^6$  m/sec h = constante de Planck =  $6.6 \times 10^{-34}$  J.s

k = constante de Boltzmann = 1,4 x 10<sup>-23</sup> Joule/K

T = température absolue du corps noir exprimée en K

 $\lambda$  = longueur d'onde (m)

<u>Note</u>: Le facteur 10<sup>-6</sup> est utilisé puisque l'excitance est exprimée en Watts/m² μm. Si ce facteur est éliminé, la dimension sera Watts/m²m.

## **Emission du rayonnement(suite)**

#### Loi de Stéfan-Boltzmann:

Cette loi définit l'émittance totale du rayonnement du corps noir

$$M^0 = \sigma T^4$$

 $\sigma$  = 5,67.10 <sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>. K<sup>4</sup> est la constante de Stéfan (la température étant mesurée en  $\Re$ ).

Pour le corps noir on a  $\alpha = 1$  et  $(\rho = \tau = 0)$ 

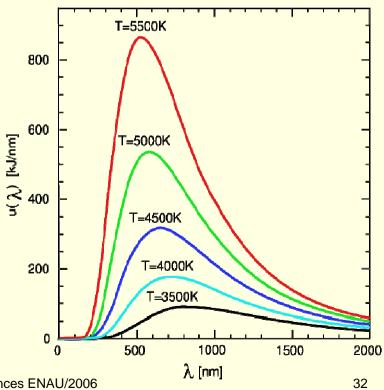
Pour un cors réel, la densité de flux s'écrit à partie de celle du corps noir .

$$\mathbf{M} = \varepsilon \mathbf{M}^0 = \varepsilon \sigma \mathbf{T}^4$$

où ε est l'émissivité totale du corps.

#### Loi du déplacement de Wien

$$\lambda_{\rm m}$$
 .T= 2898  $\mu$ m  $\%$ 



### **Emission du rayonnement(suite)**

#### Corps gris/corps sélectif

- Un corps gris est un corps qui possède les mêmes propriétés quelque soit la longueur d'onde.
- Un corps sélectif possède des propriétés différentes suivant les longueurs d'ondes.(exp: le verre).

#### Loi de Kirschoff

Cette loi stipule que, pour les corps gris, le facteur d'absorption est égal à l'émissivité.  $\alpha=\epsilon$ . Pour les corps non gris il faut faire la distinction pour chacune des longueurs d'onde.

La relation est  $\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}$ .

Dans le domaine du bâtiment, on considère généralement que les corps se comportent comme des corps gris dans chaque domaine de longueur d'onde. Ainsi,  $\rho,\,\alpha,\,\tau$  et  $\epsilon$  sont considérés constants sur tout le domaine des longueurs d'ondes du rayonnement solaire. On les considère également constants sur tout le domaine de l'infrarouge:

on a toujours:  $\alpha_s = \varepsilon_s$  domaine solaire et

 $\alpha_{ir} = \epsilon_{ir}$  domaine infrarouge

### 1-3-3-3 Echange de rayonnement entre deux corps gris

- On veut évaluer le flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces opaques et grises, séparées par un milieu parfaitement transparent. Elles sont caractérisées par leur émissivité ε<sub>1</sub> et ε<sub>2</sub> et leur température T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub>
- L'expression de la densité de flux net échangé entre les deux surfaces est donnée par :  $\phi_{12} = F_{12}$ .  $\sigma$  ( $T_1^4 T_2^4$ ) où  $F_{12}$  est le facteur de forme gris entre les deux surfaces qui dépend de leurs positions respectives et de leurs émissivités.
- Dans le bâtiment, les différences de températures entres les parois sont généralement faibles par rapport aux valeurs absolues, ce qui permet de linéariser la loi d'échange et utiliser une expression simplifiée, qui donne le flux radiatif échangé entre la surface s et l'ensemble des autres surfaces:

$$\varphi_{rs} = h_{r} \cdot (T_s - T_{mr})$$

où T<sub>mr</sub>est la température moyenne radiante des autres surfaces (Moyenne pondérée des températures des autres surfaces), Ts étant la température de surface de la paroi s

# 1-4 Déperditions thermiques de l'enveloppe d'un bâtiment en régime stationnaire

#### 1-4-1 Déperdition surfacique

#### ■ Coefficients d'échange superficiel

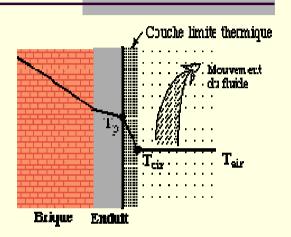
Un élément de paroi d'un bâtiment est entouré d'air sur ses deux faces. Il existe une zone dans le milieu air où la température et la vitesse de l'air varient rapidement en fonction de la distance à la paroi. Cette zone s'appelle couche limite.

La paroi sera donc isolée dans son environnement à l'intérieur des couches limites, interne et externe. A l'intérieur de ces zones, la surface externe de la paroi échange de la chaleur par convection avec l'air et par rayonnement avec le autres surfaces qu'elle voit.

Pour tenir compte de ces échanges, aussi bien du coté intérieur que du coté extérieur de la paroi, on introduit un coefficient d'échange superficiel  $h_{\rm s}$  (lié aux coefficients  $h_{\rm c}$  et  $h_{\rm r}$ ), de manière à écrire simplement l'expression du flux échangé entre la paroi à la température  $T_{\rm p}$  et le reste (parois en face et air ambiant) à la température  $T_{\rm op}$ :

$$\varphi_p = h_s (T_p - T_{op}),$$

T<sub>op</sub> étant la température opérative de la pièce, qui est une moyenne pondérée de la température de l'air Ta et la température moyenne radiante des autres parois



Dans la littérature, T<sub>op</sub> prendra respectivement la dénomination de T<sub>i</sub> et T<sub>e</sub> et h<sub>s</sub> sera remplacé par hi pour une paroi intérieure et he pour la paroi extérieure.

1/hi et1/he représentent respectivement les résistances thermiques des couches limites, intérieure et extérieure.

## (suite diapo 30)

#### Résistance thermique totale et coefficient de transfert K

Le flux de chaleur qui traverse la paroi (après le couches limites intérieure et extérieure) s'exprime alors en fonction des températures  $T_i$  et  $T_e$  et en fonction de la résistance totale R de la paroi(par unité de surface), y compris celles de couches limites de la manière suivante:  $\Phi = S.(T_i - T_e)/R$ . La résistance R étant constituée par plusieurs résistances en série s'écrit :

R= 1/hi +1/he +  $\Sigma$  R<sub>i</sub> où (R<sub>i</sub> =e<sub>i</sub>/ $\lambda$ <sub>i</sub>) pour les couches homogènes, ou lues sur les tables(valeurs mesurées en labo) pour les matériaux hétérogènes. On introduit le coefficient de transfert K = 1/R ayant comme dimension w/m<sup>2</sup> $\mathfrak{C}$  pour écrire le flux so us une forme simple:

$$\Phi = K.S.(T_i - T_e).$$

Le coefficient de transfert K exprime ainsi le flux de chaleur qui traverse une paroi par unité de surface et pour une différence de température de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur.

- En été,  $T_e > T_{i,}$  le flux de chaleur est entrant
- En hivers, T<sub>e</sub> < T<sub>i.</sub> le flux de chaleur est sortant

# Coefficients d'échange superficiels typiques DTU- Règles Th-K77(nov 1977)

On admet conventionnellement que les résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs (1/h<sub>i</sub>) et extérieurs (1/h<sub>e</sub>) ont les valeurs données dans le tableau ci-dessous, tableau où figure également la somme de ces résistances :

	Paroi en contact avec :  — l'extérieur,  — un passage ouvert,  — un local ouvert.			Paroi en contact avec :  — un autre local, chauffé ou non chauffé, — un comble, — un vide sanitaire.		
	1 h <sub>i</sub>	1 h e	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_c}$	1 h <sub>i</sub>	1 h;	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_i'}$
Paroi verticale ou faisant avec le plan horizontal un angle supérieur à 60°	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
Paroi horizontale ou faisant avec le plan horizontal un angle égal ou inférieur à 60°, flux ascendant (toiture)	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
flux descendant (plancher bas)	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

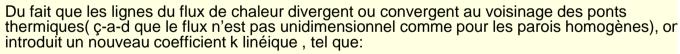
Un local est dit « ouvert » si le rapport de la surface totale de ses ouvertures permanentes sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0,005 m²/m³. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.

### 1-4-2 Ponts thermiques et pertes linéiques

En plus des pertes de chaleur à travers la partie courante de la paroi, on doit évaluer dans le bilan thermique d'un local, les pertes liées aux discontinuités de la structure. Ces discontinuités engendrent des zones de résistances thermiques plus faibles que celles des parties courantes. Ces appelle des ponts thermiques, puisqu'elle se laissent traverser par la chaleur plus facilement que les autres zones.

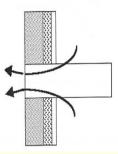
On distingue deux types de ponts thermiques:

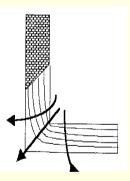
- Les ponts thermiques dus aux matériaux, qui résultent de la présence en certains points du bâtiment de matériaux ayant une plus grade conductivité thermique.
- Les ponts thermiques dus à la géométrie, rencontrés par exemple dans les angles, les coins et autres discontinuités qui présentes une résistance thermique inférieure à celle des autres parties faits du même matériau.



$$\Phi = k.l.(T_i - T_e).$$
 [k] =w/m°C

où I représente la longueur de la jonction (m). Les valeurs de k sont données dans des tables(cf DTU)





# 1-4-3 Pertes de chaleur par renouvellement d'air

- Le renouvellement de l'air vicié est une exigence réglementaire hygiénique. Il peut être réalisé soit naturellement à travers les ouvertures aménagées et les infiltrations, soit par ventilation mécanique contrôlée(VMC).
- Un renouvellement d'air de n volumes du bâtiment par heure, conduit à remplacer n volumes d'air par heure à la température intérieure Ti par le même volume d'air extérieur à la température Te. La quantité de chaleur dépensée pour amener cet air à la température Ti est Q= C<sub>v</sub>.n.V.(Ti-Te).

C<sub>v</sub> est la chaleur volumique de l'air (0,34 wh/m<sup>3</sup>℃)

### 1-4-4 Le coefficient G(w/m<sup>3</sup>°C)

- Puissance perdue pour le chauffage d'un local
- La puissance perdue par transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un local est la somme de trois processus d'échange de chaleur définis précédemment:

$$P = \sum_{i} K_{i}S_{i}(Ti-Te) + \sum_{i} k_{m}I_{m}(Ti-Te) + C_{v}.n_{i}.V_{i}(Ti-Te)$$

Si l'on définit un coefficient G comme étant égal à :

G= 1/V [
$$\sum K_j S_j + \sum k_m I_m + C_v . n_i . V_i$$
] où V= volume total du local,

La puissance perdue s'écrit alors: P= G.V.(Ti-Te)

Le coefficient **G(w/m³℃)** ainsi définie donne la puissance perdue par unité de volume et pour une différence de température de 1℃ entre l'intérieur et l'extérieur. Il caractérise les propriétés thermique de l'enveloppe en régime permanent.

### 1-4-5 Energie perdue par l'enveloppe

Pendant la saison de chauffage, l'énergie E<sub>h</sub> perdue par l'enveloppe du bâtiment du fait de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est:

$$E_h = G.V.\Sigma(Ti-Te)^+\Delta t$$
  
=  $G.V.DH_h^+$ 

DH<sub>h</sub><sup>+</sup>représente le nombre de degrés-heures de chauffage. (Le signe + en exposant signifie que seules les quantités positives à l'intérieur de la parenthèse contribuent à la somme) Pendant la saison de refroidissement, l'énergie E<sub>e</sub> qui traverse l'enveloppe du bâtiment du fait de la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur est:

$$E_e = G.V.\Sigma(Te-Ti)^+\Delta t$$
  
=  $G.V.DH_e^+$ 

DH<sub>e</sub><sup>+</sup>représente le nombre de degrés-heures de climatisation. (Le signe + en exposant signifie que seules les quantités positives à l'intérieur de la parenthèse contribuent à la somme)