

I) Introduction :

Les procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur (fours, échangeurs de chaleur, induction, refroidissement, chauffage). Les phénomènes de transfert thermique et en particulier de la chaleur, ont une importance décisive pour l'étude et le fonctionnement des appareils tels que ; les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs de chaleur, les condenseurs,etc. En raison de développement rapide de l'industrie et l'accroissement de la demande et du prix de l'énergie, l'utilisation efficace d'une installation (d'échange de chaleur) pour une dépense d'énergie minimale est le but recherché dans tous les cas. Le transfert thermique est la science qui tente à prédire le transfert d'énergie entre les molécules ou les particules de la matière à différentes températures.

Le but est d'expliquer la manière et de prédire le taux d'échange de la chaleur sous certaines conditions spécifiques. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique par des lois expérimentales additionnels afin d'établir les proportions de transfert d'énergie.

Le transfert de chaleur est une science qui contient plusieurs concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industriels. Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents, la conduction, la convection et le rayonnement. Les connaissances de base dans ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes.

Le transfert de chaleur peut être défini comme étant la transmission de l'énergie d'une région à une autre une fois la différence de température entre elles établi. Il est régi par une combinaison de lois physiques et de relations empiriques déduites de l'expérimentation. Dans la littérature relative à cette discipline, on reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

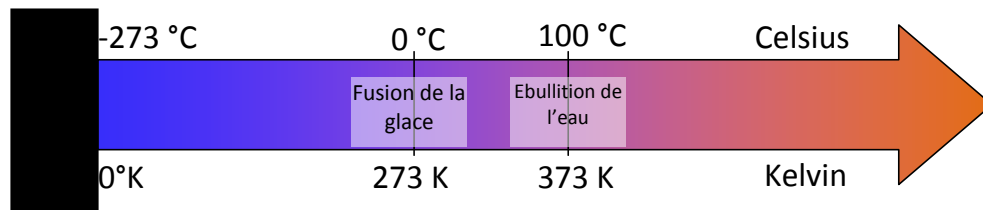
II) Définitions

II.1) La température :

L'agitation des particules est d'autant plus grande que la température est grande : c'est pourquoi l'unité du système international définissant la température est le Kelvin.

En effet à 0 K l'agitation des atomes est nulle, ils sont immobiles, on ne peut donc pas avoir de température inférieure à 0K

0 Kelvin = -273,15 °C



II.2) La chaleur :

La **chaleur** est l'autre nom de **l'énergie thermique**

La chaleur est l'énergie cinétique désordonnée totale (rotationnelle, translationnelle et vibratoire) associée à un groupe de particules (habituellement des atomes, des ions et des électrons) à l'intérieur du corps.

La chaleur se note généralement ΔQ et s'exprime en Joule (J).

L'énergie contenue dans un corps dépend donc de sa température et du nombre des molécules qui le constituent.

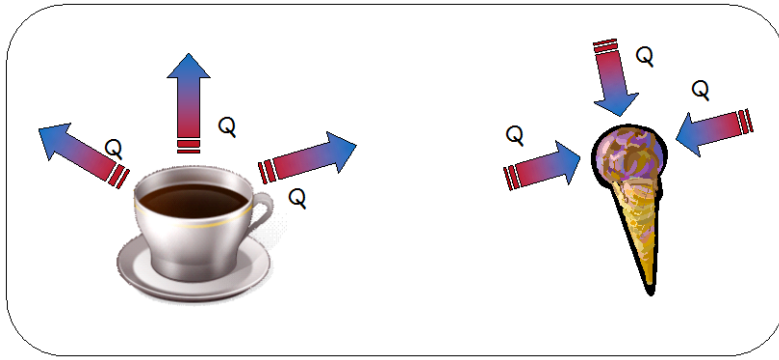
$Q = m \times C \times T$ où	<p>Q (J) définit la chaleur ou énergie thermique</p> <p>m (kg) est la masse du corps</p> <p>C (J.kg⁻¹.K⁻¹) est la capacité calorifique du corps qui traduit la quantité de chaleur que peut contenir un corps par kg et par degré</p>
---------------------------------	---

Remarque : en tant qu'énergie du désordre au contraire du travail qui est l'énergie de l'ordre, la chaleur est qualifiée d'énergie dégradée. En effet, en thermodynamique (science des échanges d'énergie), on montre que s'il est possible de transformer totalement du travail en chaleur, la réciproque est fausse : il est impossible de transformer totalement de la chaleur en travail (c'est d'ailleurs l'un des énoncés du second principe de la thermodynamique). Ainsi, on considère que le stade ultime de transformation de l'énergie est l'obtention de chaleur.

II.3) Transfert d'énergie thermique, flux de chaleur :

Comme une tasse de café chaude se refroidit ou qu'une glace fond si l'on attend. Leur température ou leur phase a changé il y a donc eu un transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur se fait du corps chaud vers le corps froid.



Un transfert d'énergie par chaleur peut se manifester par :

- une variation de température des systèmes concernés.
- un changement d'état physique (liquide → solide → gaz).

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient (hausse ou baisse) de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{S} \frac{dQ}{dt} \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$$

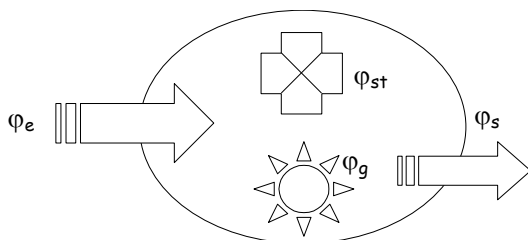
Où S est l'aire de la surface en m²

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \text{ (W)}$$

II.4) Formulation d'un problème de transfert de chaleur :

Il faut définir un système par ses limites spatiales et établir l'inventaire des différents flux de chaleur :



φ_{st} : flux de chaleur stocké

φ_s : flux de chaleur sortant

φ_e : flux de chaleur entrant

φ_g : flux de chaleur généré

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$$

III) Différents modes de transmission ou génération de la chaleur.

	Convection	Rayonnement	Diffusion thermique
Principe	Déplacement de matière et donc de chaleur suivant le	Transport d'énergie par le biais du champ	Vibrations ou chocs dans la matière se propageant de proche en proche des milieux chauds vers les milieux froids ce qui est une

	principe d'Archimède	électromagnétique	application du second principe
<i>Vide</i>	Non	Oui	Non
<i>Solide</i>	Non	Oui, si transparent	Oui
<i>Fluide</i>	Oui	Oui, si transparent	Oui

III.1) Conduction ou diffusion thermique :

III.1.1) Qualification de la conduction :

On chauffe une barre métallique à son extrémité. . Cette chaleur est conduite tout le long de la barre métallique.

L'expérience montre que le débit de chaleur est proportionnel à la différence de température entre les deux côtés de la plaque.

Cette différence de température dépend aussi de la nature des matériaux qui conduisent la chaleur et ils sont caractérisés par leur conductivité thermique.

La grandeur qui détermine l'aptitude d'une substance à transmettre la chaleur est appelée **conductivité thermique** (λ) exprimée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, qui dépend de la structure atomique de la substance.

Les métaux ont une conductivité thermique environ 400 fois plus grande que celle des autres solides, ceux-ci conduisent mieux que la plupart des liquides, enfin ces derniers la conduisent 10 fois mieux que les gaz (cf tableau ci-dessous).

Quand vous vous réveillez un matin froid et ne marchez pas sur le tapis, mais sur le carrelage, les pieds nus, vous comprenez alors ce que veut dire la conductivité thermique. Le carrelage et le tapis sont à la même température, car ils ont été toute la nuit en équilibre thermique. Mais vous avez l'impression que le carrelage est plus froid que le tapis. Le carrelage a une conductivité thermique environ 10 fois plus grande que celle du tapis et il ôte 10 fois plus de chaleur de vos pieds, qui sont à température plus élevée. C'est cette perte de chaleur que vous sentez comme « froideur » et non la différence de température ; en fait, nous ne sommes pas de bons thermomètres.

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque sans déplacement de matière sous l'influence d'une différence de température.

La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue suivant deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

Matériau	λ en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Polyuréthane	0,025
air	0,026
Polystyrène extrudé	0,03
Soie	0,04
Laine de chanvre	0,04
Polystyrène expansé	0,04
Perlite exfoliée	0,05
Laine de coco	0,05
Liège expansé	0,05
Panneaux de fibre de bois	0,05
Laine de lin	0,035 à 0,038
Ouate de cellulose	0,035 à 0,040

Laine de roche	0,038 à 0,047
Laine de verre	0,034 à 0,056
Vermiculite exfoliée	0,05 à 0,07
Chanvre en vrac	0,05 à 0,07
Brique de chanvre	0,12
Papier	0,13
Bois de sapin	0,13
Huile moteur	0,15
Brique monomur	0,11 à 0,18
Bois	0,10 à 0,25
Béton cellulaire	0,16 à 0,24
Placoplatre	0,46
Eau	0,58
Bloc de terre comprimée	1,05
Brique de terre crue	1,1
Brique de terre cuite	1,15
Verre	1,2
Béton plein	1,75
Pierre lourde	2,1 à 3,5
acier	46 à 52
Fer	73
Cuivre	386

Généralement, un bon conducteur de la chaleur est aussi un bon conducteur de l'électricité ; ce n'est pas une coïncidence. Un métal peut être considéré comme un réseau cristallin d'ions positifs immergés dans une mer d'électrons essentiellement libres. La chaleur et l'électricité sont, toutes deux, principalement transportés par le mouvement de ces électrons libres, qui se comporte comme un fluide très mobile dans le métal.

Dans les mauvais conducteurs d'électricité, le transport de chaleur se fait principalement par le mode plus lent de collision moléculaire.

III.1.2) Quantification de la conduction : Loi de Fourier

En outre, si on se limite au régime stationnaire (les températures d'entrée et de sortie ne change pas) et si le matériau de l'échantillon est homogène, la puissance thermique est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la pièce.

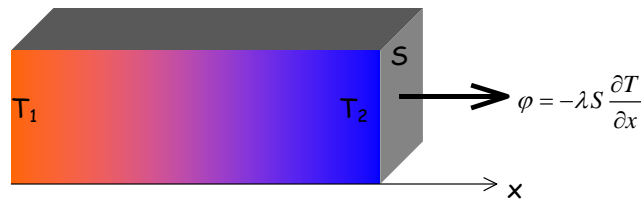
Cette loi est connue sous le nom de **Loi de conduction de Fourier**.

Pour une différence ΔT donnée, plus l'épaisseur L est grande, plus P_T est faible. Plus vos vêtements sont épais par temps froid, plus le taux de perte de chaleur est bas.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de

température : $\vec{\varphi} = -\lambda \text{grad } T$

Ou sous forme algébrique : $\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}$ (W) et avec λ en $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$



III.2) Convection :

Transfert d'énergie qui s'accompagne de déplacement de molécules dans un fluide.

III.2.1) Convection naturelle :

Les changements de propriétés du corps chauffé entraînent le déplacement des molécules et participent ainsi au brassage et la répartition de l'énergie calorifique globale.

Le transfert d'énergie se fait par le mouvement du fluide soumis à des écarts de température.

Exemple : l'air chaud (de part son agitation moléculaire) est moins dense (et donc plus léger que l'air froid) et s'élève (sous l'effet de la poussée d'Archimède) en échangeant de l'énergie avec les molécules plus froides

III.2.2) Convection forcée :

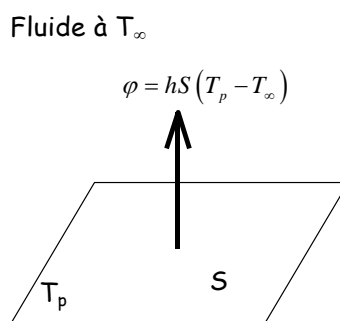
On met les molécules en mouvement par un dispositif mécanique et on les envoie sur un dispositif chauffant.

Améliore le transfert thermique.

III.2.3) Loi relative à la convection:

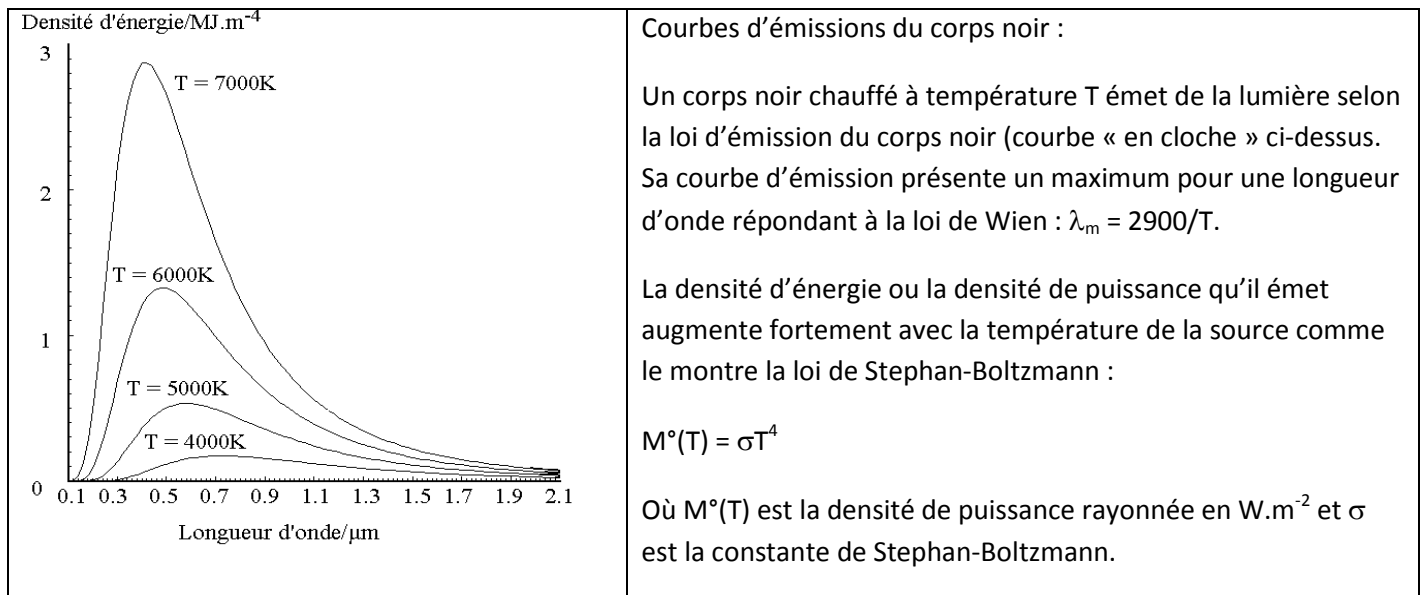
C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme est régi par la loi de Newton : $\varphi = hS(T_p - T_\infty)$

avec h le coefficient de transfert de chaleur par convection qui dépend de la nature du fluide de sa vitesse de sa température et des caractéristiques géométriques de la surface de contact.



III.3) Rayonnement :

III.3.1) Caractéristiques des objets vis à vis du rayonnement :



Le transfert d'énergie est assuré sans support matériel, par les ondes électromagnétiques (infrarouge, visible, ultraviolet, micro-ondes...).

Le transfert d'énergie thermique par rayonnement ne nécessite donc pas de milieux matériel pour son transfert (il est donc possible même si le vide sépare les deux corps : énergie du soleil sur la terre)

Vis à vis du rayonnement un corps est caractérisé par ses coefficients

- ρ : facteur de réflexion
- τ : facteur de transmission ou transmissivité (plus ou moins opaque)
- α : facteur d'absorption ou absorptivité

On a bien évidemment : $\rho + \alpha + \tau = 1$

De plus, tout corps qui s'échauffe émet dans son environnement un rayonnement de longueur d'onde inversement proportionnelle à sa température. La loi de Wien donne la longueur d'onde du maximum d'émission en fonction de la température du corps

$$\lambda_m \cdot T = 2898 (\mu m.K)$$

Plus la température est élevée , plus le rayonnement a une forte intensité et plus celui-ci se déplace vers les longueurs d'ondes courtes. λ_{max} d'abord invisible puis rouge (700nm) puis blanc puis bleu (470nm).

Ce rayonnement est plus ou moins intense suivant le coefficient **d'émissivité ϵ** du corps. Plus ce coefficient est faible (proche de 0), moins le corps émet. Les valeurs de l'émissivité vont de 0 à 1 (corps noir).

III.3.2) Transfert d'énergie due au rayonnement :

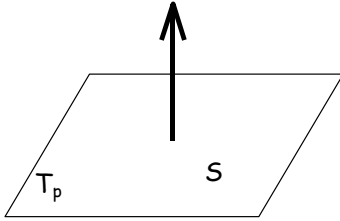
C'est un transfert d'énergie entre deux surfaces (même dans le vide).

Entre un solide et le milieu environnant, nous avons la relation : $\varphi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S (T_p^4 - T_\infty^4)$ en W

Milieu à T_∞

Avec

$$\varphi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S (T_p^4 - T_\infty^4)$$



- φ : le flux de chaleur transmis par rayonnement
- σ : constante de Stephan : $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- ε : facteur d'émission de la surface

III.4) Stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie dans un corps correspond à une augmentation de son énergie interne au cours du temps

d'où $\varphi_{st} = \rho \cdot V \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$

Avec ρ : masse volumique (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V volume

C chaleur massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

III.5) Génération d'énergie :

Elle intervient lorsqu'une autre forme d'énergie (chimique, électrique, mécanique, nucléaire) est convertie en énergie thermique. Nous pouvons l'écrire sous la forme :

$$\varphi_g = \phi V \quad (\text{en W})$$

avec ϕ densité volumique d'énergie générée (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

et V en m^3 .

IV) Résistance et capacité thermique : modélisation.

IV.1) Résistance thermique :

IV.1.1) Mur monocouche :

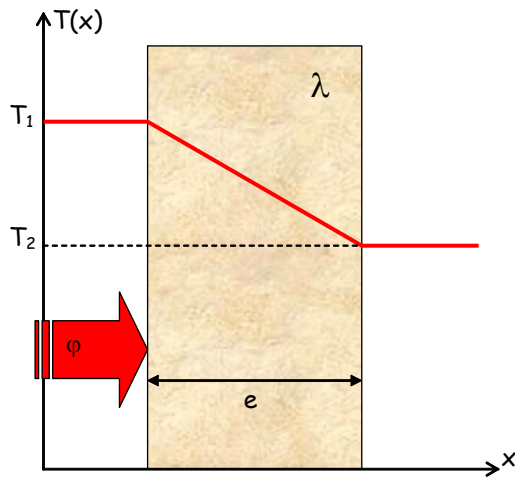
Le profil de température dans un matériau soumis à un flux de chaleur est linéaire, ce que nous révèle la loi de Fourier.

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \text{ soit } \phi = \frac{\varphi}{S} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{e} \text{ en (W.m}^2\text{)}$$

Ce que l'on peut aussi mettre sous la forme

$$\varphi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{\lambda S}}$$

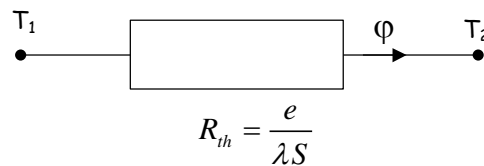
$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \text{ en K.W}^{-1}$$



Cette relation est analogue à la loi d'ohm en électricité qui définit l'intensité d'un courant comme le rapport de la différence de potentiel électrique sur la résistance électrique.

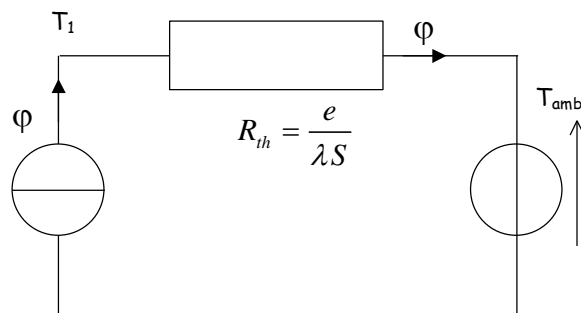
La température apparaît ainsi comme un potentiel thermique et le terme $\frac{e}{\lambda S}$ apparaît comme la résistance thermique d'un mur plan d'épaisseur e , de conductivité thermique λ et de surface S .

On a donc le schéma équivalent suivant :



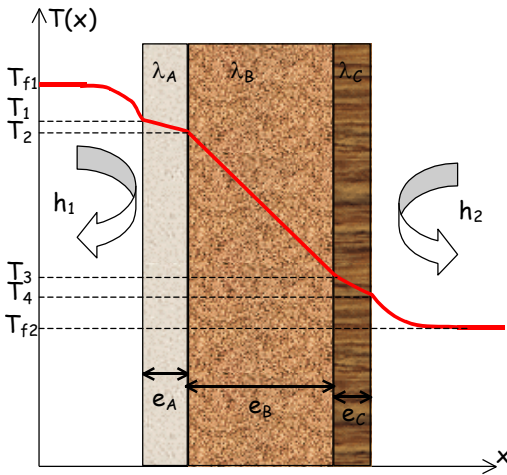
L'ensemble du système peut donc être modélisé ainsi :

- générateur de flux (générateur de courant)
- à travers la résistance thermique du système
- soumise à la température ambiante (tension imposée)



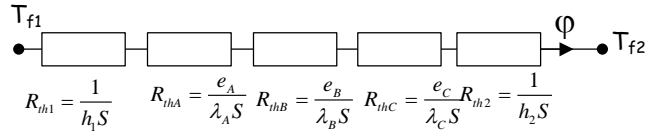
Remarque : Classiquement les fabricants d'isolant donnent le paramètre $\frac{e}{\lambda}$ de leur isolant

IV.1.2) Mur multicouches :

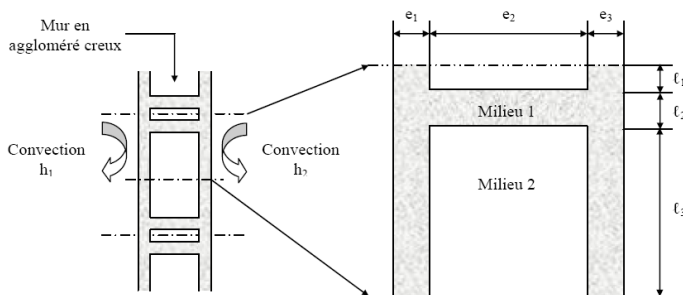


$$\varphi = \frac{(T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

Et son analogie électrique



IV.1.3) Mur composite :

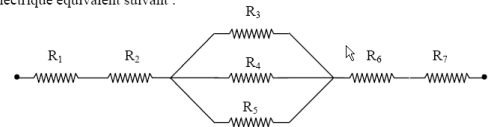


$$R = R_1 + R_2 + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} + R_6 + R_7$$

avec :

$$R_1 = \frac{1}{h_1 \ell L}; R_2 = \frac{e_1}{\lambda_1 \ell L}; R_3 = \frac{e_2}{\lambda_2 \ell_1 L}; R_4 = \frac{e_2}{\lambda_1 \ell_2 L}; R_5 = \frac{e_2}{\lambda_2 \ell_3 L}; R_6 = \frac{e_3}{\lambda_1 \ell L}; R_7 = \frac{1}{h_2 \ell L}$$

selon le schéma électrique équivalent suivant :

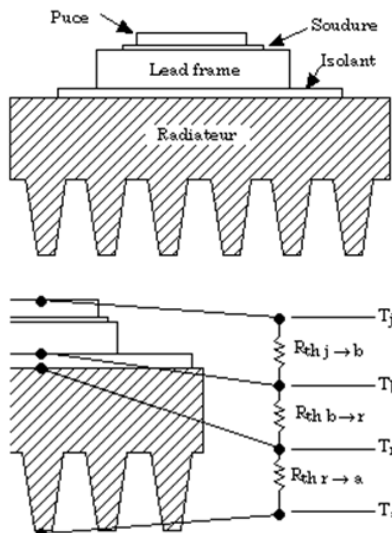


IV.1.4) Radiateur de composant :

L'échauffement d'un élément, ici la jonction dépend de la puissance électrique mise en jeu et des échanges thermiques du système avec l'extérieur.

Les composants de puissance doivent dissiper une puissance importante. Pour éviter un échauffement excessif. Il faut avoir une résistance thermique la plus faible possible. Pour cela, on place le composant sur un radiateur ayant une résistance faible permettant de dissiper la chaleur.

(Lead frame est la plaque de cuivre sur laquelle est soudée la puce de silicium)



La puissance se propage de la jonction vers le boîtier puis du boîtier vers le radiateur. On a les relations suivantes :

$$\text{On a } T_j - T_a = R_{th} \cdot P$$

T_j température de la jonction (°C ou K).;

T_a température ambiante (°C ou K) ;

P puissance dissipée ;

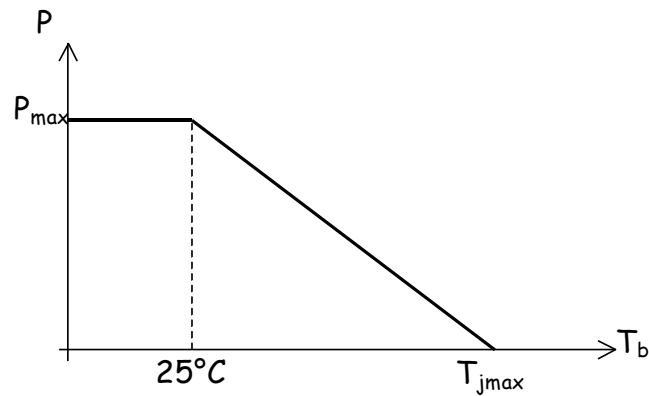
R_{th} résistance thermique en °C/W ou K/W .

$$\left. \begin{aligned} R_{th\ j \rightarrow b} &= \frac{T_j - T_b}{P} \\ R_{th\ b \rightarrow r} &= \frac{T_b - T_r}{P} \\ R_{th\ r \rightarrow a} &= \frac{T_r - T_a}{P} \end{aligned} \right\} R_{th} = R_{th\ j \rightarrow b} + R_{th\ b \rightarrow r} + R_{th\ r \rightarrow a}$$

En pratique, les constructeurs de transistors (et autre semi-conducteurs de puissance) donnent rarement directement la résistance thermique des composants.

Il faut noter que la résistance thermique du composant sans radiateur à l'air libre est nettement plus élevée que celle du composant avec radiateur.

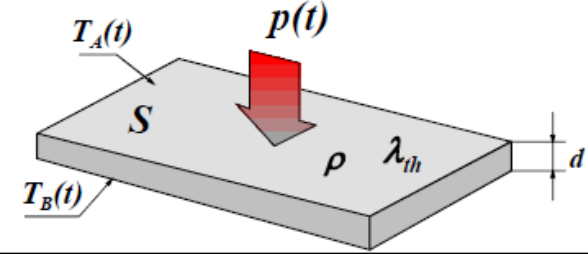
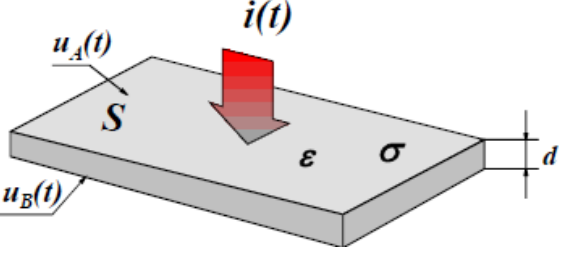
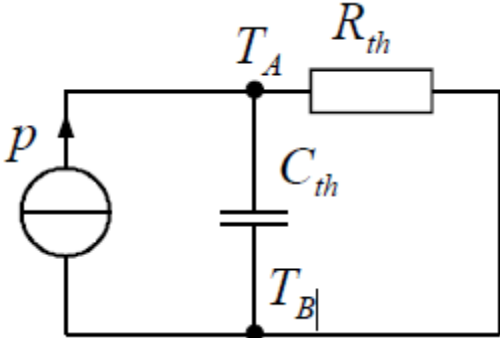
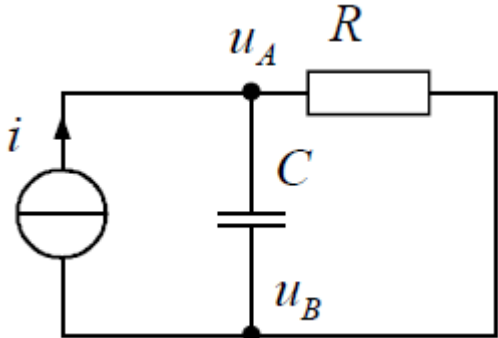
Ils donnent très souvent la puissance maxi et la température de jonction maxi, qu'il faut interpréter en général comme suit : la puissance maxi est donnée pour une température de boîtier maintenue à 25°C (radiateur infini, soit avec une résistance thermique $R_{th\ r \rightarrow a}$ nulle) et une température de jonction maximale.



IV.2) Capacité thermique :

L'énergie nécessaire pour faire passer un corps d'une température T₁ à T₂ est donné par la relation :

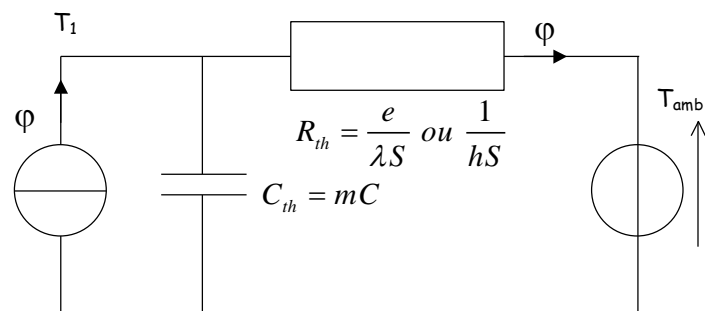
Modèle thermique			Modèle électrique		
T	Température	[K]	U	Tension	[V]
J	Flux de chaleur	[W.m ⁻²]	J	Densité de courant	[A.m ⁻²]
$P = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$	Chaleur	[W]	$I = -\sigma S \frac{dU}{dx} = \frac{\Delta U}{R}$	Courant	[A]
$Q(t) = \int_0^t p(t) dt$	Quantité de chaleur	[W.s] = [J]	$Q(t) = \int_0^t i(t) dt$	Charge	[A.s] = [C]

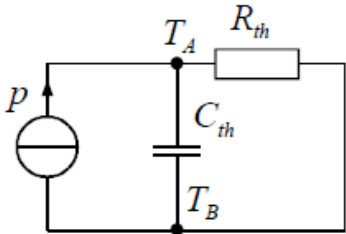
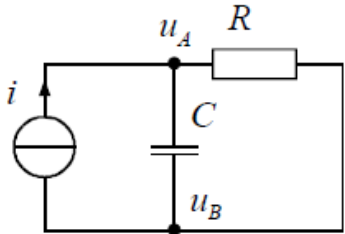
λ_{th}	Conductivité	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	σ	Conductivité	$[\Omega^{-1}.m^{-1}]$
$R_{th} = \frac{d}{\lambda \cdot S}$	Résistance	$[K.W^{-1}]$	$R_{th} = \frac{d}{\sigma \cdot S}$	Résistance	$[\Omega]$
$C_{th} = \frac{dQ}{dT} = c \cdot \rho \cdot d \cdot S$	Capacité	$[W.s.K^{-1}]$	$C = \frac{i \cdot dt}{dU} = \frac{dQ}{dU} = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$	Capacité	$[A.s.V^{-1}] = [F]$
					
 <p>P : chaleur sortant du dipôle</p>					
$p(t) = \frac{T_A(t) - T_B(t)}{R_{th}} + C_{th} \frac{d}{dt} (T_A(t) - T_B(t))$			$i(t) = \frac{u_A(t) - u_B(t)}{R} + C \frac{d}{dt} (u_A(t) - u_B(t))$		

L'élévation de température d'un corps n'est pas instantanée et demande une énergie Q (qui par analogie correspond à une quantité d'électricité Q).

Par analogie il apparaît que à la capacité électrique correspond une capacité thermique mC_{th} soumise à la différence de « potentiel » ΔT .

Le schéma équivalent électrique d'une installation est donc celui ci

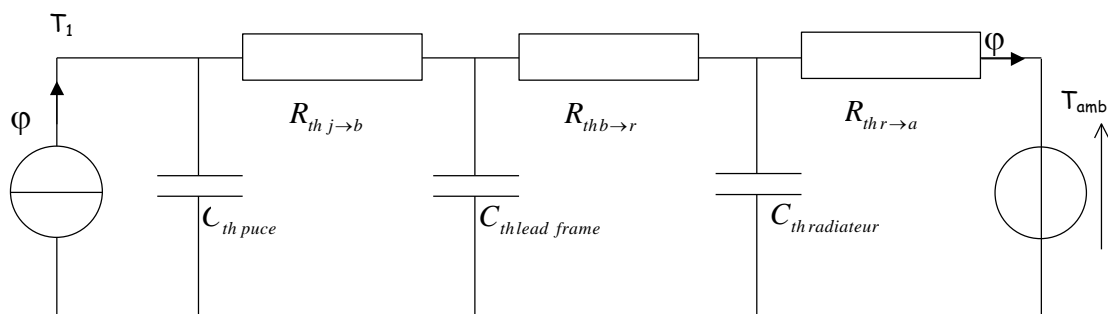


Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
$C_{th} = \frac{dQ}{dT}$	$C = \frac{dQ}{dU}$
$C_{th} = c \cdot \rho \cdot d \cdot S$	$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$
$R_{th} = \frac{d}{\lambda_{th} \cdot S}$	$R = \frac{d}{\sigma \cdot S}$
$Q(t) = \int_0^t p(t) \cdot dt$	$Q(t) = \int_0^t i(t) \cdot dt$
	
$p(t) = \frac{T_A(t) - T_B(t)}{R_{th}} + C_{th} \frac{d}{dt} (T_A(t) - T_B(t))$	$i(t) = \frac{u_A(t) - u_B(t)}{R} + C \frac{d}{dt} (u_A(t) - u_B(t))$

Il apparaît qu'un tel système répond à une équation différentielle du premier ordre caractérisée par une constante

de temps $\tau = R_{th} C_{th} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{e}{\lambda S} \\ \frac{1}{hS} \end{array} \right\} \rho V C = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\rho V C e}{\lambda S} \\ \frac{\rho V C}{hS} \end{array} \right.$

Le système vu précédemment aura donc pour modèle équivalent :



Il sera donc nécessaire de prendre en compte l'inertie thermique du système en cas de puissance instantanée dépassant les sollicitations possible duc composant alors que la puissance moyenne sera bien en deçà des limites du composant.

V) Différents procédés de production de la chaleur :

V.1) Chauffage par résistance:

V.1.1) Résistances de chauffage

Le passage d'un courant électrique dans une résistance produit un dégagement de chaleur, c'est la loi de Joule

$P_j = R \times I^2$ avec $R = \frac{\rho l}{S}$. L'énergie thermique ainsi produite se transmet par rayonnement, conduction,

convection vers le solide ou le fluide à traiter. L'intérêt de ce type de chauffage est sa simplicité et son faible coût d'investissement.

Les éléments chauffants peuvent être soit nus, à l'air libre, soutenus par des supports réfractaires ; ils sont généralement portés au rouge.

Soit blindés c'est à dire protégés par une enveloppe métallique, étanche et inoxydable.

Les applications actuelles sont les fours, les étuves de séchage et le chauffage des fluides.

Réglages :

Réglage par angle de phase :

Pour régler l'énergie transmise,

on règle la valeur efficace du courant et de la tension.

Ce réglage introduit beaucoup d'harmoniques.

Réglage par train d'ondes :



V.1.2) tube a passage de courant (TPC).

V.2) Chauffage par induction :

On distingue le chauffage direct et le chauffage indirect

- Dans le chauffage direct, le corps à chauffer est conducteur de l'électricité et de la chaleur. Placé dans un champ magnétique variable dans le temps, il s'échauffe sans contact par l'effet Joule dû aux courants induits (courants de Foucault).

- Dans le chauffage indirect, le produit à chauffer est peu (ou pas) conducteur de l'électricité ou de la chaleur. Il est placé en contact avec un élément sensible à l'induction qui s'échauffe et lui transmet sa chaleur

L'intérêt de cette méthode est sa rapidité de chauffage localisé avec une régulation fine, une faible inertie thermique, une forte densité de puissance et un rendement élevé. Les applications du chauffage par induction se trouvent principalement dans la métallurgie-mécanique, la chimie et l'agro-alimentaire.

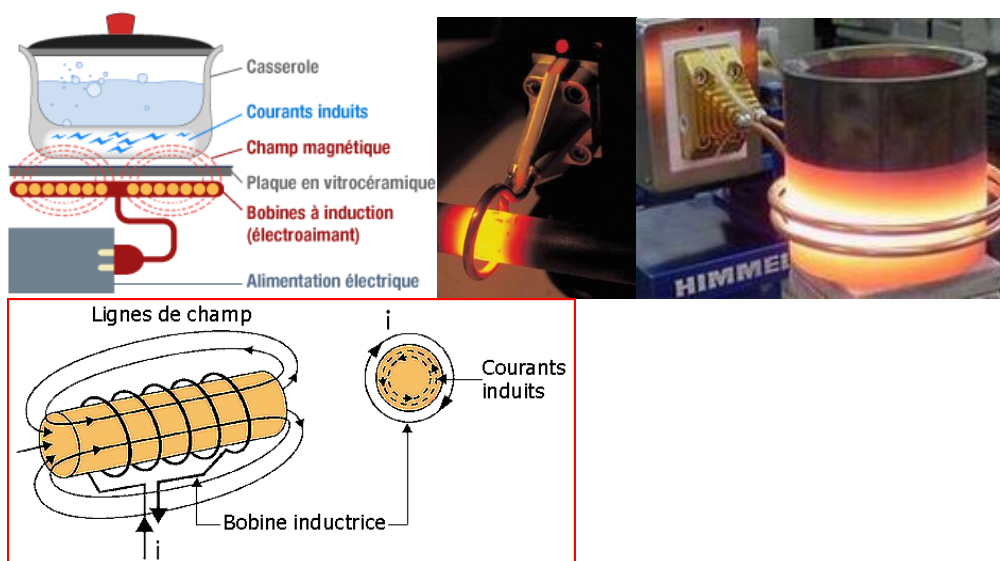
Le champ magnétique pénètre sur la pièce à chauffer sur une profondeur = distance de pénétration.

La fréquence règle l'uniformité du chauffage, le champ magnétique règle la puissance de chauffe.

Le réglage peut se faire par l'utilisation d'un onduleur à résonance.(four à induction).

Les pièces à chauffer doivent être bonnes conductrices du champ magnétique.

Les matériaux magnétiques perdent leur propriété magnétique au delà d'une certaine température appelée température de Curie. On ne peut pas les utiliser si on doit chauffer au delà de celle-ci.

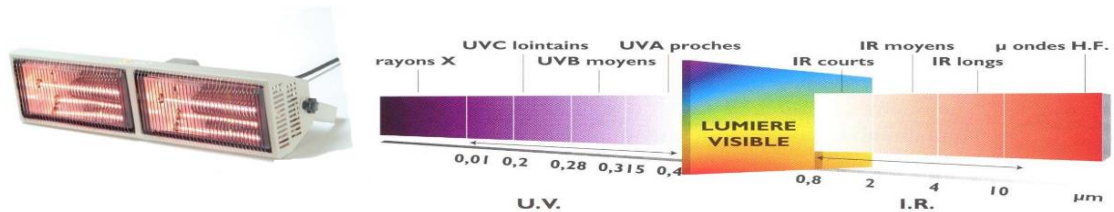


V.3) Chauffage par rayonnement infrarouge :

Ce sont des radiations électromagnétiques de longueurs d'ondes comprises entre 0,8 et 10 micromètres qui provoquent un échauffement limité (<250°C) sur une profondeur faible en fonction de la longueur d'onde. Cette technique est utilisée pour le séchage rapide de vernis, bois, fourrages, cuirs, peintures, denrées alimentaires, etc.....et met en œuvre des lampes, des tubes ou des panneaux rayonnants.

La puissance rayonnée par une source se sépare en trois parties. Une partie réfléchie, une partie transmise et une partie absorbée. C'est cette dernière qui est responsable de l'échauffement.

$P = \sigma \cdot S_2 \cdot \alpha \cdot (T_1^4 - T_2^4)$	<p>P en W</p> <p>S_2 :surface du corps à chauffer.</p> <p>T_1 température source.</p> <p>T_2 température du corps à chauffer.</p> <p>αfacteur de forme :facteur compris entre 0 et 1 selon matériaux.</p> <p>$\sigma +5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ou $^\circ\text{C}^{-1}$ constante de Stefan-Boltzmann.</p>
---	---

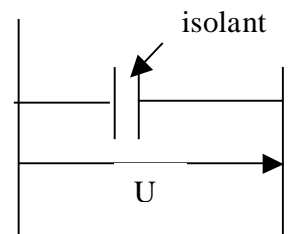


V.4) Chauffage par micro-onde :

En très haute fréquence, un matériau isolant placé entre deux paques conductrices s'échauffe.

Ce procédé est utilisé industriellement pour traiter les isolants par la chaleur : matières plastiques, textiles...

Il est également utilisé pour le réchauffage des aliments dans les fours à micro-ondes.

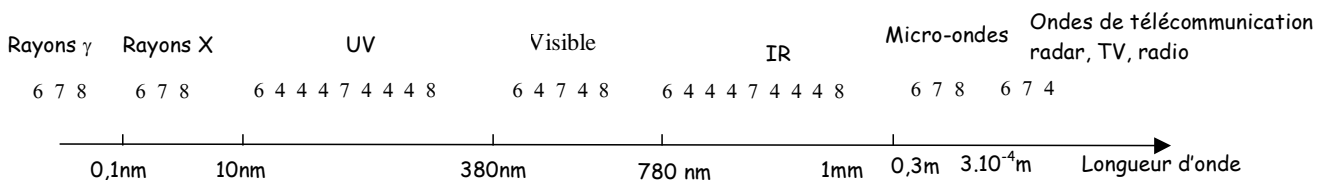


$$P = w \cdot \epsilon_0 \cdot \rho \cdot V \cdot E^2$$

$w=2\pi f$ pulsation de la micro-onde.

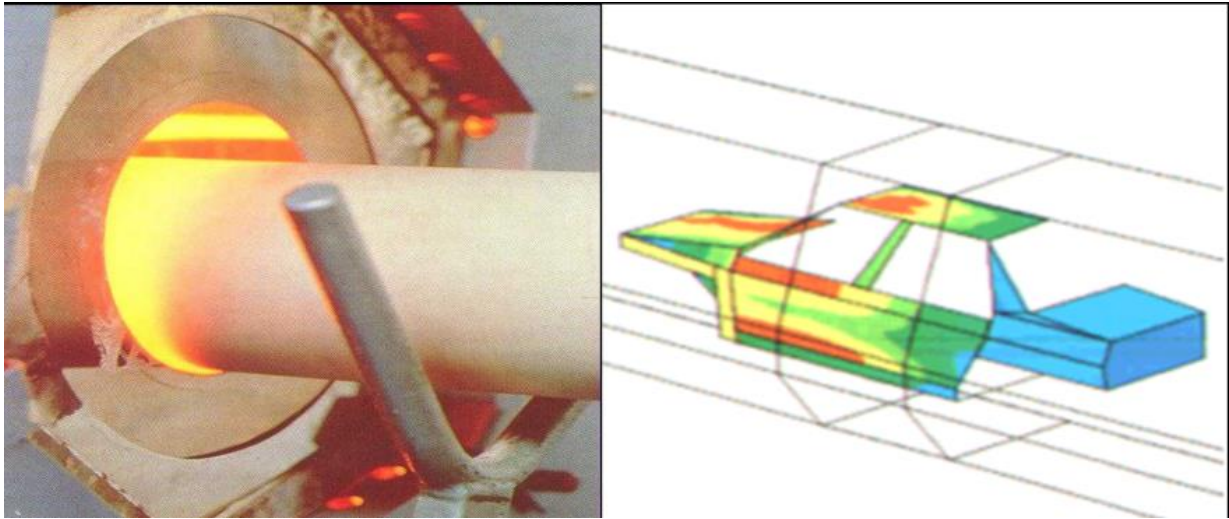
$\epsilon_0=1/(4 \cdot \pi \cdot 10^{-9})$ permittivité du vide.

ρ facteur de pertes dépend de f et de T température $10^{-3} < \rho < 100$. P en W



V.5) Chauffage diélectrique :

Utilisée pour les corps isolants, cette méthode consiste à placer l'isolant dans un champ électrique alternatif. L'élévation de température est provoquée par les transformations que subissent les molécules du diélectrique soumises au champ électrique alternatif. Cette technique permet d'obtenir un chauffage à cœur ou un chauffage sélectif rapide.



V.6) Autres :

Le chauffage par ultra-violet : les rayons ultra-violet produisent de la chaleur utilisée pour le séchage de peintures ou la polymérisation des résines. Ils sont dangereux pour les yeux et donc d'une utilisation limitée.

Chauffage par arc : Quand on sépare deux électrodes parcourues par un courant électrique, il se produit un arc électrique. Si l'on entretient cet arc, on obtient une source de chaleur de température élevée

(3000°C). Applications : soudage à l'arc, four électrique de fusion des métaux.