

**OBJECTIFS**

- ① Connaître les différents modes de transmissions de la chaleur : convection, conduction et rayonnement
- ② Appréhender les notions de résistance thermique et capacités thermiques.
- ③ Décrire différents procédés de production de la chaleur (résistance, induction, micro-ondes, infrarouge).

**I- TRANSMISSION DE LA CHALEUR**

**1- Généralités**

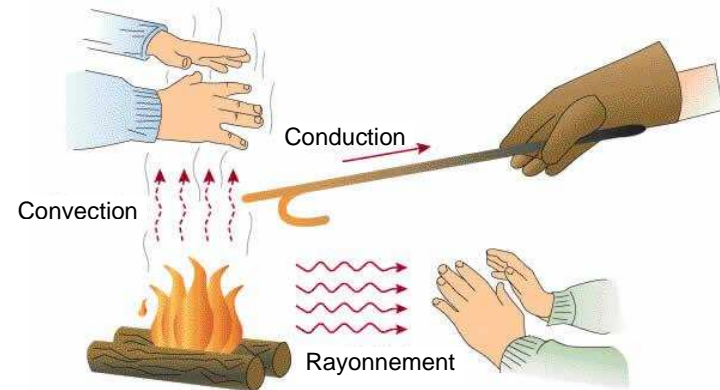
1- Chaleur et température : deux notions différentes

- La chaleur est une **énergie** (Joule).  
⇒ La chaleur reçue par un corps a pour effet d'augmenter sa température.
- La température est un **état** thermodynamique.  
⇒ Deux corps à même température et mis en contact n'échangent pas de chaleur.  
⇒ La chaleur circule spontanément du corps chaud vers le corps froid.

2- Description rapide des modes de transmission de chaleur

- ① **Conduction** : Dans les solides ou les fluides au repos, l'agitation moléculaire se transmet de proche en proche.  
⇒ Les métaux sont en général de bons conducteurs.  
⇒ Le bois et les matières plastiques sont de mauvais conducteurs (isolant thermique).
- ② **Convection** : Il s'agit ici de la chaleur transportée par des fluides en mouvement.  
⇒ La **convection naturelle** est due aux forces de pesanteur et à la masse volumique du fluide qui diminue avec la température (l'air chaud s'élève).  
⇒ On peut réaliser une **convection forcée** à l'aide d'un ventilateur (ventilateur + radiateur dans les CPU d'ordinateur).
- ③ **Rayonnement** : Les corps chauds émettent de l'énergie sous forme d'onde électromagnétique (rayonnement).  
⇒ La propagation se fait sans contact (vide ou air).  
⇒ Le rayonnement peut être visible ou invisible (ultraviolet ou infrarouge).

Le schéma ci-dessous illustre les trois types de conduction thermique :



**2- Grandeurs et unités**

1- La température (T)

- ① Le degré Celsius (°C ou C) :  
Cette unité est basée sur les différents états de l'eau pure.  
→ Mélange glace-eau (fusion) : T = 0°C  
→ Mélange eau-vapeur (ébullition) : T = 100°C
- ② Le degré Kelvin (°K ou K) :  
Cette unité est basée sur l'état d'énergie de la matière. Lorsque la matière n'a plus d'énergie (agitation nulle des particules) on est alors à 0°K (-273,15°C).  
→ On a :  $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$
- ③ Le degré Fahrenheit (F) *Pour information*  
Cette unité est moins utilisée; on peut la définir par : 0°C → 32 F et 100°C → 212 F  
La relation entre °C et F est :  $\frac{^{\circ}\text{C}}{100} = \frac{\text{F} - 32}{180}$

Remarque : Dans la suite du cours, nous n'utiliserons que le °C et °K.

2- La chaleur (Q)

La chaleur est une énergie, son unité sera donc le joule (J).  
On peut définir le joule thermique ainsi :  
Il faut 4186 J pour élever de 1°C une masse de 1kg d'eau.

Une autre unité, moins utilisée, est la calorie (cal) : c'est la chaleur nécessaire pour élever 1g d'eau de 1°C.

Les nutritionnistes utilisent la kilocalorie (kcal).

Remarque : Dans la suite du cours, nous n'utiliserons que le joule (J).

### 3- Capacité thermique

L'accumulation de chaleur Q (joule) dans un corps de masse m (kg) engendre une augmentation de sa température  $\Delta T = T_2 - T_1$  (°C ou K).

La relation entre Q ; m et T introduit la capacité thermique massique c :

$$Q = m.c.\Delta T$$

avec c capacité thermique massique du matériau en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  (appelé aussi chaleur massique).

Le tableau ci-dessous donne la capacité thermique massique de matériaux courants :

Substance	Phase	Capacité thermique massique $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Air (sec)	gaz	1005
Air (saturé en vapeur d'eau)	gaz	≈ 1030
Aluminium	solide	897
Cuivre	solide	385
Eau	gaz	1850
	liquide	4186
	solide (0 °C)	2060
Éthanol	liquide	2460
Fer	solide	444
Hélium	gaz	5190
Huile	liquide	≈ 2000
Hydrogène	gaz	14300
Or	solide	129
Oxygène	gaz	920

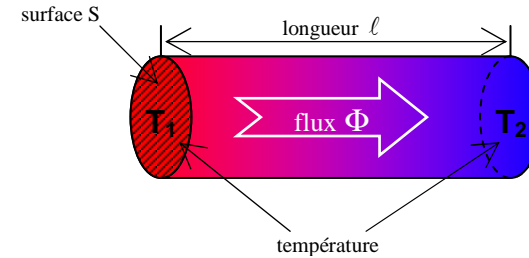
→ **Faire l'exercice 1** (chauffe-eau piscine)

## 3- Transfert thermique par conduction

### 1- Principe

Prenons une portion de matériau (surface S et longueur  $\ell$ ) dont une extrémité est à la température  $T_1$  et l'autre extrémité à la température  $T_2$ .

Un flux d'énergie thermique  $\Phi$  (en watt) traverse alors le matériau (du plus chaud vers le plus froid).



### 2- Loi de la conduction

La relation entre  $\Phi$ ,  $T_1$  et  $T_2$  est :

$$T_1 - T_2 = R_{th} \Phi$$

avec  $R_{th}$  ( $K.W^{-1}$ ) résistance thermique du matériau.

La résistance thermique  $R_{th}$  a les propriétés suivantes :

- $R_{th}$  est proportionnelle à  $\ell$  et inversement proportionnelle à S
- $R_{th}$  est inversement proportionnelle à la conductance thermique  $\lambda$  du matériau (plus le matériau est conducteur, moins il sera résistant).

On en déduit la relation suivante :  $R_{th} = \frac{\ell}{\lambda S}$  ( $\ell$  en m ; S en  $m^2$  ;  $\lambda$  en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

Le tableau ci-dessous donne la conductivité thermique de matériaux courants :

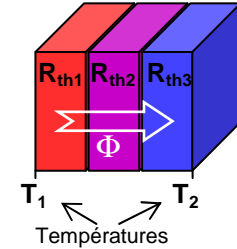
Matériaux	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
	Valeurs pour une température de 20 °C
Diamant	1000-2600
Argent	418
Cuivre	390
Or	317
Aluminium (pureté de 99,9%)	237
Carbone	129
Platine	71,6
Acier doux	46
Acier inoxydable (18% Chrome, 8% Nickel)	26
Verre	1,2
Béton	0,92
Terre (sèche)	0,75
Eau	0,6
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
brique (terre cuite)	0,84
Adobe (terre crue)	0,32
Bois de pin (perpendiculaire aux fibres)	0,15
Liège	0,04
Laine de verre	0,04
Paille (perpendiculaire aux fibres)	0,04
Polystyrène expansé	0,036
Mousse de Polyuréthane rigide	0,035
Air (100 kPa)	0,0262

→ **Faire l'exercice 2** (isolation thermique bâtiment)

### 3- Lois d'association des résistances thermiques

#### ■ Parois superposées (association "série")

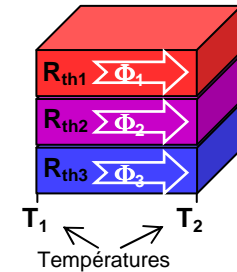
Dans le cas de plusieurs parois superposées (traversées par le même flux), la résistance thermique totale  $R_{th\ série}$  est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi :



Association série de n parois :  $R_{th\ série} = R_{th1} + R_{th2} + \dots + R_{thn}$

#### ■ Parois juxtaposées (association "parallèle")

Dans le cas de plusieurs parois juxtaposées (de mêmes températures  $T_1$  et  $T_2$ ), la résistance thermique totale  $R_{th\ parall}$  suit la loi ci-dessous :



Association parallèle de n parois :  $\frac{1}{R_{th\ série}} = \frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}} + \dots + \frac{1}{R_{thn}}$

### 4- Analogie avec l'électricité

Grandeurs électriques	Grandeurs thermiques
Intensité I (A)	Flux $\Phi$ (W)
Tension $V_A - V_B$ (V)	Température $T_A - T_B$
Résistance électrique R ( $\Omega$ )	Résistance thermique $R_{th}$ (K.W <sup>-1</sup> )
Loi d'Ohm : $V_A - V_B = RI$	Conduction thermique : $T_A - T_B = R_{th}\Phi$
Association série : $R_s = R_1 + R_2 + \dots$	Association série : $R_{th\ série} = R_{th1} + R_{th2} + \dots$
Association parallèle : $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$	Association parallèle : $\frac{1}{R_{th\ parall}} = \frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}} + \dots$

→ **Faire l'exercice 3** (pont thermique)

## 4- Transfert thermique par convection

### 1- Principe

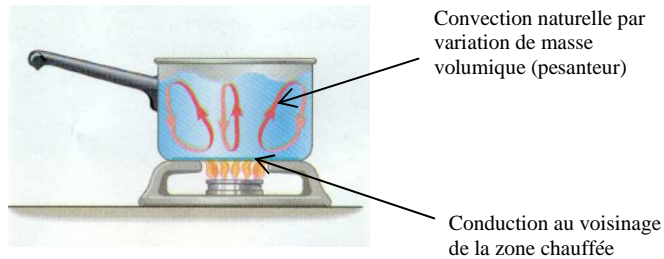
C'est, de façon générale, un transfert de chaleur entre deux phases de nature différente. Elle intervient, par exemple, à la surface de séparation entre un solide et un fluide (liquide ou gaz) mais aussi à la surface libre entre un liquide et un gaz.

Le transfert de chaleur s'effectue en 2 phases :

- ① Phase de conduction : la chaleur est échangée par conduction entre la surface solide et une mince couche de fluide (appelée "film"), au voisinage de la surface.
- ② Phase de convection : le fluide du film est déplacé dans la masse du fluide ; ce déplacement du fluide est, soit **naturel** (variation de la masse volumique du film chauffé ou refroidi), soit **artificiel** (action d'une pompe, d'un agitateur). On parle alors soit de convection naturelle, soit de convection forcée.

Dans la convection, l'échange de chaleur se fait donc par **déplacement de matière**.

L'image ci-dessous illustre un phénomène de convection très utilisé (chauffage d'un liquide dans une casserole) :



### 2- Loi de Newton

On est dans le cas d'une paroi solide (surface  $S$ ) à la température uniforme  $T_1$  en contact avec un fluide de température uniforme  $T_2$ .

Si on considère le cas  $T_2 > T_1$ , on a alors :

$$\Phi = hS(T_2 - T_1)$$

où  $h$  est le **coefficient de convection** en  $W.m^{-2}.K^{-1}$

On peut aussi définir la résistance thermique :  $R_{th} = \frac{(T_2 - T_1)}{\Phi}$  soit  $R_{th} = \frac{1}{h.S}$ .

*Remarque* : Dans le modèle de Newton, la convection ne dépend que de la surface en contact et non de l'épaisseur de la couche fluide.

Le coefficient de convection  $h$  est très variable, il dépend par exemple de la position horizontale ou verticale de la paroi.

Le tableau ci-dessous donne des ordres de grandeurs très approximatifs de quelques coefficients de convection :

Nature de la convection	Coefficient de convection $h$
Convection libre (air)	de 5 à 20
Convection libre (eau)	de 100 à 900
Convection forcée (air)	de 15 à 500
Convection forcée (eau)	de 150 à 15000

→ **Faire l'exercice 4** (collage thermique)

## 5- Transfert thermique par rayonnement

### 1- Principe

La matière est constituée pour beaucoup de particules chargées (protons, électrons dans les atomes). Donc quand elles s'agitent, elles créent des perturbations du champ électromagnétique, c'est à dire qu'elles émettent de la lumière. Donc **tout objet dont la température n'est pas le zéro absolu émet de la lumière en permanence.**

La lumière émise par un objet est caractérisée par sa couleur (sa fréquence) et son intensité. Ces deux caractéristiques sont liées à la température de l'objet. Plus il est chaud, plus ses molécules bougent vite donc plus la fréquence de la lumière est grande, c'est à dire que sa couleur va tendre du côté du bleu.

A l'inverse, un objet à température ambiante (mettons 20°C), dont les molécules ne sont pas très agitées, émet à une fréquence assez basse : ce sont des **infrarouges**, que nous ne pouvons voir. Il existe des caméras qui voient les infrarouges (caméras thermiques), et qui les transforment en images sur un écran : on voit alors en brillant les zones les plus chaudes, comme le corps de quelqu'un.

### Quelques exemples :

- ① Le filament d'une ampoule émet de la lumière parce qu'il est chauffé par le passage du courant électrique. C'est ce qu'on appelle une lampe à incandescence, et elle émet une lumière assez blanche (chaude).



- ② La surface de la lave en fusion est moins chaude que le filament de l'ampoule. Elle aussi brille, car elle est très chaude, mais elle n'émet que du rouge.

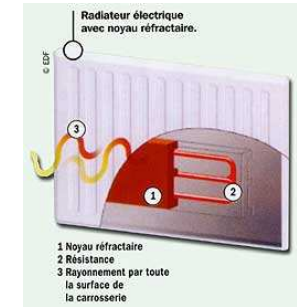


- ③ Les étoiles ont des couleurs différentes, du rouge au bleu, parce qu'elles ont des températures différentes. Les plus chaudes sont bleues ou blanches, alors que les plus "froides" sont rouges. On peut ainsi connaître la



température d'un objet très chaud rien qu'en regardant la lumière qu'il émet.

- ④ Cette propriété sert aussi pour le chauffage : les panneaux rayonnants sont des panneaux qui émettent des infrarouges. On ne les voit pas, mais on les sent bien : lorsque les infrarouges arrivent jusqu'à vous, ils vous communiquent leur énergie, et ils vous réchauffent.

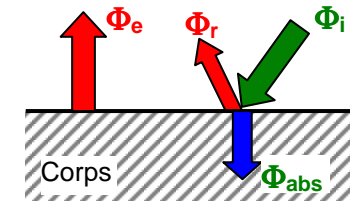


### 2- Bilan radiatif (cas général)

La surface d'un corps à la température T doit être considéré comme :

- émetteur d'un rayonnement lié à sa température T (flux émis  $\Phi_e$ )
- récepteur d'un rayonnement incident  $\Phi_i$ , en partie absorbé  $\Phi_{abs}$  et en partie réfléchi  $\Phi_r$  ( $\Phi_i = \Phi_{abs} + \Phi_r$ ).

Le schéma ci-contre montre le bilan radiatif :



### 3- Le corps noir

Le corps noir est un corps idéal qui absorbe tout le flux incident  $\Phi_i$  ( $\Phi_r = 0$ ). A l'équilibre thermique, on a  $\Phi_e = \Phi_{abs} = \Phi_i$ .

Le modèle du corps noir pourra être utilisé dans de nombreux cas (surface noire non réfléchissante)

Il existe deux lois qui permettent de déterminer la longueur d'onde et la puissance thermique émise par le corps noir en fonction de sa température.

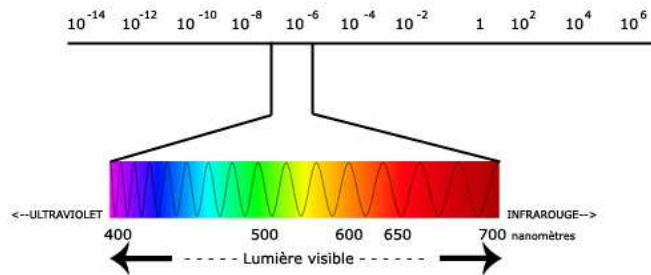
① La loi de Wien pour la longueur d'onde (couleur)

Le corps noir émet sur toutes les longueur d'ondes mais le maximum de puissance sera sur la longueur d'onde  $\lambda_{\max}$ .

La relation entre  $\lambda_{\max}$  ( $\mu\text{m}$ ) et T (K) est :

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Diagramme de la lumière visible (couleur) :



① La loi de Stefan-Boltzmann pour la puissance ( $\Phi_e$ ) :

Le flux thermique  $\Phi_e$  (W) émis par la surface S (m<sup>2</sup>) du corps noir à la température T (K) s'exprime par la relation :

$$\Phi_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot S \cdot T^4$$

On définit aussi d'émittance M du corps noir le quotient  $\frac{\Phi_e}{S}$ .

→ *Faire l'exercice 5 (Capteur chauffe-eau solaire)*

## II- PRODUCTION DE CHALEUR PAR ÉLECTRICITÉ

### 1- Chauffage par résistance électrique

#### 1- Principe

Le principe utilisé est l'effet Joule, une résistance R ( $\Omega$ ) parcourue par une courant I (A) reçoit de la puissance électrique.

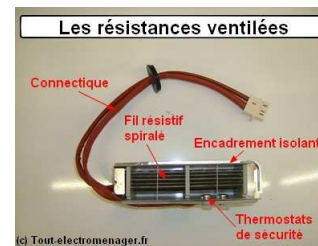
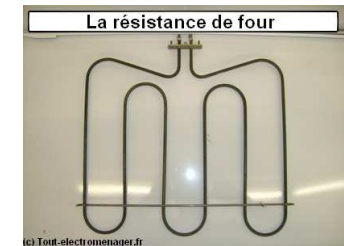
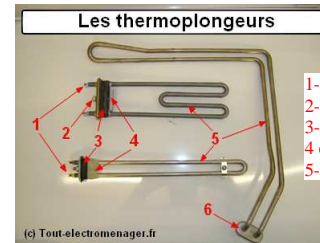
A l'équilibre thermique, cette puissance électrique est transformée en puissance calorifique P<sub>J</sub> (W) transmise principalement par conduction et convection.

La relation est :

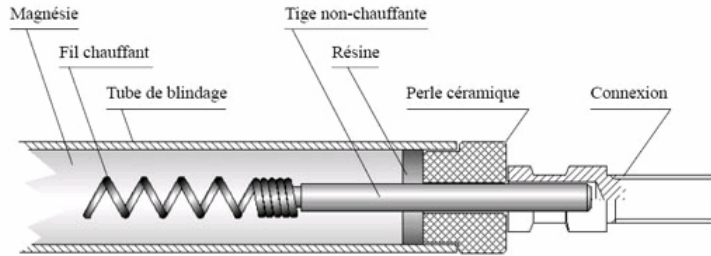
$$P_J = R \cdot I^2$$

Le chauffage par résistance est facile à mettre en œuvre mais coûteux en énergie.

#### 2- Différents modèles



Structure interne d'une résistance chauffante :



### 3- Avantages et inconvénients

#### ■ Avantages

Bon marché à l'achat.  
Facile à installer.

#### ■ Inconvénients

Consommation électrique importante (≈17 h de fonctionnement sur 24 h).  
Problèmes de salissures des murs.  
Mauvaise répartition de la chaleur.  
Sensation désagréables, odeurs ...  
Régulation (+ ou - 3°C).  
Dessèchement de l'air (problèmes allergiques).

## 2- Chauffage par induction

### 1- Principe

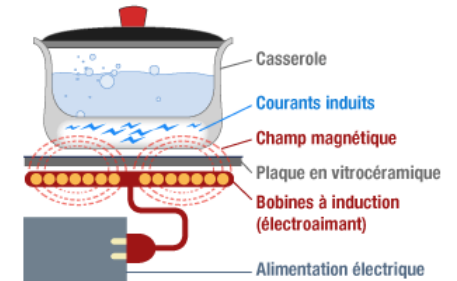
Le chauffage à induction fonctionne, comme son nom l'indique, sur le principe de l'induction électromagnétique, une des plus efficaces façons de transmettre de l'énergie "sans contact".

Les bobines à induction, alimentées par un courant électrique alternatif, créent un champ magnétique variable qui excite les électrons du métal de la casserole. Ils se mettent à bouger dans tous les sens : ça chauffe!

L'induction se manifeste chaque fois qu'un matériau conducteur est en mouvement au sein d'un champ magnétique. Ou inversement, à chaque fois qu'un champ magnétique variable baigne un matériau conducteur.

### 2- Application : la plaque à induction

Sous la plaque de cuisson en vitrocéramique, un électroaimant constitué d'enroulements de cuivre est alimenté avec un courant alternatif à **50kHz**. Il crée ainsi un champ magnétique variable. Celui-ci induit directement des courants électriques dans le fond de la casserole (courant de Foucault).



Le courant chauffe la matière qu'il traverse. Enfin, quand elle est magnétisable, c'est à dire quand les électrons qui la composent s'agitent sous l'effet d'un champ magnétique. Voilà pourquoi la plaque en vitrocéramique, insensible à l'activité de l'électroaimant, ne chauffe pas.

Le rendement atteint est bon (jusqu'à 95%).

### 3- Avantages et inconvénients

#### ■ Avantages :

Réglage de la chaleur à diffuser de manière précise et rapide.  
Chauffage de parties inaccessibles, comme par exemple des morceaux de métal, encastrés dans du bois ou du PVC.  
Economie d'espace dans la mesure où la chaleur est présente elle-même dans la matière, la radiation thermique est alors faible  
Meilleures conditions de travail sans saleté ni fumée par rapport aux installations traditionnelles de chauffage  
Rendement plus important (moins de perte de chaleur et d'émission).

#### ■ Inconvénients :

Lors de mauvaises manipulations, d'autres objets peuvent être involontairement chauffés.  
Coûts d'acquisition élevés pour les fortes puissances  
Des champs électromagnétiques peuvent apparaître ce qui peut alors perturber l'environnement, lorsque les isolations sont mauvaises.

### 3- Chauffage par microondes

#### 1- Historique

Le four à micro-ondes est un pur dérivé des efforts de recherche de la deuxième guerre mondiale. Des professeurs anglais avaient mis au point un **magnétron** capable de générer des ondes ultra courtes. On s'aperçut vite que ce prototype pouvait accoucher d'un système de repérage et une entreprise américaine eut pour mission de développer et perfectionner ce radar.

La légende veut que ce soit les ingénieurs qui le matin se réchauffaient auprès du tube d'émission du radar et faisait chauffer leurs déjeuners grâce aux micro-ondes.

le premier four à micro-ondes (1947) fut commercialisé par Raytheon; il s'agit du *Radarange*. Il mesurait 1,8 mètre de haut pour un poids de 340 kilogrammes. Il était refroidi par un système à base d'eau, avait une puissance de 3 000 watts et produisait trois fois plus de radiations parasites qu'un four à micro-ondes actuel.

Dans les années 1980, ce sont les Japonais (Toshiba et Sanyo) qui réaliseront un **magnétron** performant pour les fours à micro-ondes de ménage.

#### 2- Constitution interne et principe de fonctionnement

##### ① Alimentation électrique

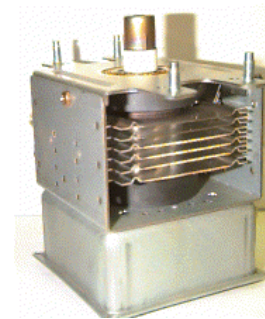
Le magnétron de 1000 W (puissance fournie) demande environ 2500 V à 0,6 A en alimentation électrique continue.

L'alimentation est très simple: un transformateur d'alimentation unique pour le filament et la THT et un redressement mono-alternance avec une diode associée à un condensateur de filtrage.

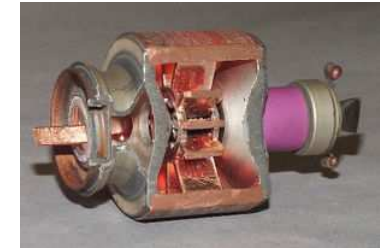
⚠ Il est à noter que les parties sous haute tension présentent un danger mortel et que le dépannage d'un micro-ondes sous tension avec le capot ouvert est extrêmement dangereux.

##### ② Le magnétron

Le magnétron génère des ondes électromagnétiques à la fréquence 2,45 GHz



Magnétron avec ses ailettes de refroidissement



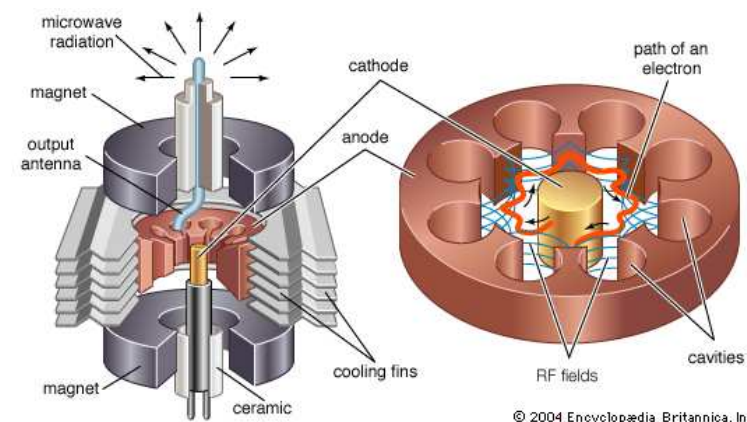
Vue interne du magnétron

La géométrie interne du magnétron (cavités + fentes) ainsi qu'un champ magnétique extérieur (aimant) imposent une trajectoire bien définie aux électrons sortant de la cathode.

Les mouvements très énergétiques des électrons induisent une onde électromagnétique dans les cavités résonnantes.

L'onde est ensuite acheminée (guide d'onde) vers l'antenne pour se diffuser dans le four.

le schéma suivant illustre le fonctionnement du magnétron :





### ③ Cuisson des aliments

Les micro-ondes de fréquence 2,45 GHz font osciller les molécules d'eau contenues dans les aliments.

Les oscillations des molécules d'eau (H<sub>2</sub>O) produisent de la chaleur à l'intérieur de l'aliment. La profondeur de pénétration des ondes est d'environ 5cm, au-delà la chaleur est transmise par conduction à l'intérieur d'une grosse pièce à cuire.

Le magnétron fonctionne par cycles : 7,5 secondes de travail puis 7,5 secondes de repos. Ce procédé permet aux aliments de mieux absorber la chaleur.

### 3- Avantages et inconvénients

#### ■ Avantages

Le principal avantage procuré par le four à micro-ondes en comparaison aux autres modes de cuisson est indéniablement la rapidité et la facilité d'utilisation.

Le four à micro-ondes offre par ailleurs la possibilité de décongeler rapidement et de manière efficace.

Contrairement au chauffage par induction, le récipient contenant l'aliment ne chauffe pas, on a donc un gain d'énergie.

#### ■ Inconvénients

Les objets métalliques introduits dans le four réfléchissent les ondes (arc électriques, destruction du magnétron ...).

La répartition de la chaleur dans l'aliment n'est pas parfaite, d'où l'utilisation de plateau tournant et d'hélices métalliques brasseuses d'onde.

Pour éviter les perturbations électromagnétiques, la solution est le blindage de la porte avec un système de verrouillage du four à l'ouverture et un hublot d'observation blindé (verre armé, grillage à mailles fines).

## 4- Chauffage par infrarouge

### 1- Principe

Le panneau rayonnant, ou le projecteur rayonnant chauffe comme sont nom l'indique par émission de rayonnement infrarouge, c'est un peu le principe du soleil ou du feu de camp, le rayonnement est absorbé par les corps, les murs les meubles, ce sont ces surfaces qui transforment le rayonnement en chaleur.

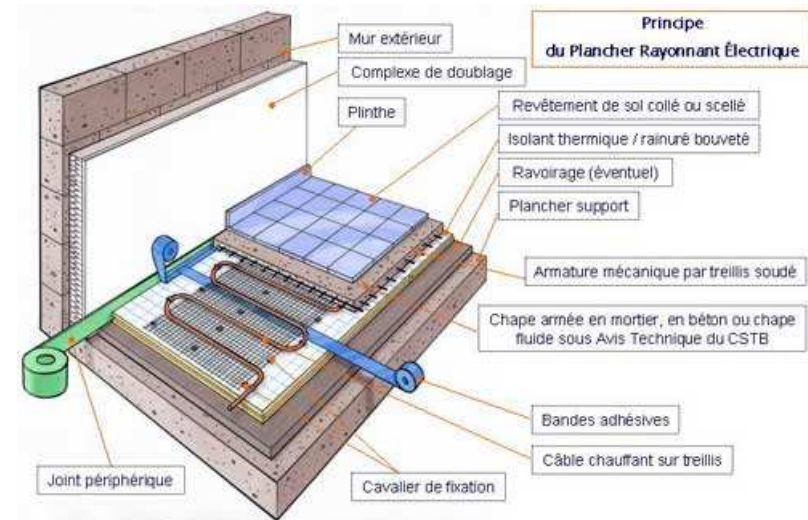
Il existe plusieurs types de panneaux rayonnants selon les caractéristiques des émetteurs utilisés (du plus froid au plus chaud):

- IRL infra rouge long :  $25\mu\text{m} < \lambda < 1000\mu\text{m}$
- IRM infra rouge moyen :  $2,5\mu\text{m} < \lambda < 25\mu\text{m}$
- IRC Infra rouge court :  $0,8\mu\text{m} < \lambda < 2,5\mu\text{m}$

### 2- Applications

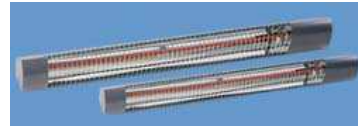
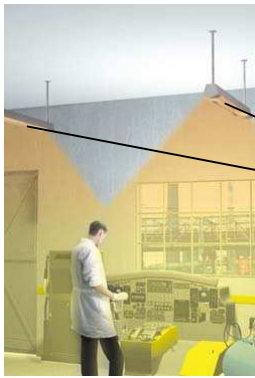
- En logement et tertiaire on utilisera des IRL comme les planchers ou les plafonds rayonnants intégrant les résistances électriques dans les structures ou les panneaux rayonnants (chauffage par rayonnement puis convection).

*La figure ci-dessous détaille la technologie du plancher rayonnant électrique (résistances noyées dans la chape):*



- En gros tertiaire et industrie on utilisera de l'IRM généralement sous forme de cassettes rayonnantes.

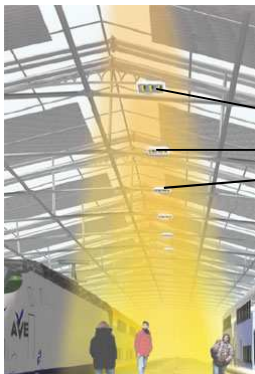
La figure ci-dessous montre un atelier chauffé par cassette IRM:



Cassettes IRM monophasée (230 ou 400V)  
Puissance de 1000W à 2000W

- Dans les très grands bâtiments (industries, églises, gymnases) ou tout simplement en extérieur on utilisera de l'IRC sous forme de projecteurs équipés de lampes halogènes spécifiques. Les appareils IRC équipent aussi les fours à peintures, les machines destinées à la fabrication des bouteilles en plastique et trouvent de nombreuses application en séchage comme en cuisson.

La figure ci-dessous montre un atelier chauffé par cassette IRC :



Projecteurs halogènes IRC  
(monophasé ou triphasé)  
Puissance de 1500W à 6000W

### 3- Avantages et inconvénients

#### ■ Avantages

La chaleur infrarouge est focalisée uniquement là où elle est requise (le corps humain absorbe très bien l'infrarouge).

La chaleur se propage directement par ondes (moins de convection, moins de brassage de poussières, moins de dessèchement de l'air ...)

Gain de place et économie d'énergie.

Dans un four infrarouge, il n'y a ni contact, ni support.

Les temps de réponse des systèmes de chauffage infrarouge sont courts à l'allumage et à l'extinction.

#### ■ Inconvénients

Certains émetteurs infrarouges sont très chauds (halogènes), ils présentent donc des dangers de brûlures.

Sensation de forte chaleur face à l'appareil mais sensation inverse pour la partie du corps se trouvant de l'autre côté.