

## Chapitre 1

### Généralités.

#### **1.1 Introduction**

La thermique est la discipline qui permet à l'ingénieur de comprendre et de décrire le fonctionnement d'un grand nombre d'équipements industriels qui ont comme caractéristique commune de mettre en œuvre des échanges de chaleur.

La civilisation industrielle, née au XVIIème siècle, a été d'abord dominée par la vapeur, si bien que de nos jours, le thermicien est encore souvent défini dans l'industrie, comme « celui qui s'occupe des chaudières et des réseaux de vapeur ».

#### **1.2 Notion de chaleur**

En physique, on appelle *chaleur* une forme particulière de l'énergie. L'équivalence de la chaleur et du travail constitue *le premier principe de la thermodynamique*. Il en résulte qu'énergie, travail et quantité de chaleur ont une même unité: le joule.

A la base de l'étude des transferts thermiques se trouvent les concepts de *quantité de chaleur* et de *différence de température*.

Le transfert de chaleur d'une partie d'une substance à une autre partie, ou d'un corps à un autre corps, s'effectue sous forme d'énergie cinétique d'agitation moléculaire désordonnée.

Ce transfert est le fait d'une différence de température entre les deux corps. La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant ainsi la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier, dans la mesure où le volume des deux corps reste constant. Ceci constitue *le second principe de la thermodynamique*.

Ce second principe met en évidence la notion d'*irréversibilité*: La chaleur ne pourra pas se propager d'un corps froid vers un corps chaud, sauf si on fournit un travail.

### 1.3 Notion de température

On appelle température la grandeur physique qui mesure le degré de chaleur d'un corps ou d'un milieu.

Lorsque deux corps sont placés dans une enceinte adiabatique, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température. On dit alors qu'on a atteint l'équilibre thermique. ( Figure 1)

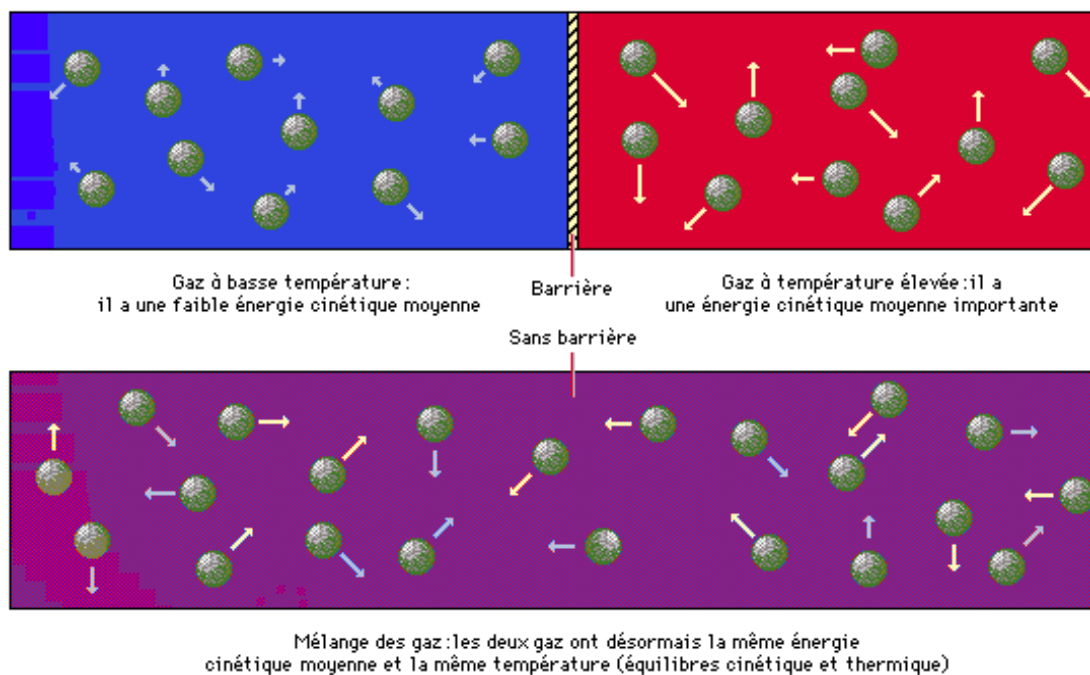


Figure 1 - Illustration des notions de transfert de chaleur, de température et d'équilibre thermique

La température est une propriété thermodynamique du corps et mesure l'agitation microscopique de la matière. Selon la théorie cinétique, la température d'un corps est fonction de l'énergie cinétique moyenne de translation de ses molécules (Figure 1). L'énergie cinétique d'un corps est nulle à une température appelée zéro absolu.

### 1.4 Mesures de température

On peut mesurer la température d'un corps en observant le changement de l'une de ses propriétés spécifiques, telle que la résistivité électrique ou bien le volume spécifique. Ainsi, le thermomètre à mercure mesure la dilatation d'une colonne de mercure dans un capillaire en verre, la variation de la longueur de la colonne étant liée à la température.

La résistance électrique d'un conducteur ou d'un semi-conducteur augmente avec la température. Ce phénomène est à la base du thermomètre à résistance, dans lequel une tension constante, ou potentiel

électrique, est appliquée à la thermistance, partie sensible du capteur. Pour une thermistance de composition donnée, la mesure d'une température donnée induit une résistance spécifique pour la thermistance. Cette résistance peut se mesurer à l'aide d'un galvanomètre et donne une mesure de la température.

Diverses thermistances faites d'oxydes de nickel, de manganèse ou de cobalt sont utilisées pour mesurer des températures entre 46°C et 150°C. De même, des thermistances utilisant d'autres métaux ou alliages peuvent être employées à des températures plus élevées : le platine, par exemple (jusqu'à 930 °C). Avec des circuits de transformation du signal adéquats, la mesure du courant peut être convertie en mesure numérique directe de la température.

Des mesures de température très précises peuvent être faites avec des thermocouples dans lesquels une faible différence de tension (se mesurant en millivolts) apparaît lorsque deux fils de métaux différents sont réunis pour former une boucle dont les deux liaisons sont portées à des températures différentes. Suivant le type de thermocouple, on peut mesurer des températures allant de 200°C à 2 300°C. Pour les températures très élevées, et pour des milieux agressifs, le thermocouple doit être protégé dans une gaine d'alumine. Pour accroître le signal de tension, plusieurs thermocouples peuvent être connectés en série pour former une thermopile. La tension dépendant de la différence entre les températures des liaisons, l'une de ces liaisons doit être maintenue à une température de référence connue, sinon, un circuit de compensation électronique doit être intégré au système pour mesurer la température réelle du capteur.

Les thermistances et les thermocouples ont souvent des capteurs d'une taille inférieure à 3 cm, ce qui leur permet de répondre rapidement aux variations de température et en fait des systèmes idéaux pour de nombreuses applications en biologie et en ingénierie.

Le pyromètre optique est utilisé pour mesurer les températures d'objets solides au-delà de 700°C. À de telles températures, les objets solides émettent suffisamment d'énergie dans la gamme visuelle pour permettre une mesure optique en exploitant le phénomène de température apparente de la couleur d'incandescence, la couleur émise par les objets incandescents allant du rouge sombre au jaune puis au blanc vers 1 300°C. Le pyromètre contient un filament analogue à celui d'une ampoule électrique, commandé par un rhéostat calibré, de façon que les couleurs du filament incandescent correspondent à des températures précises. Ainsi, la température d'un objet incandescent peut être mesurée en regardant cet objet à travers le pyromètre et en réglant le rhéostat jusqu'à ce que le filament devienne invisible sur le fond de l'objet : alors les températures du filament et de l'objet sont égales et peuvent être lues sur l'échelle du rhéostat.

Un autre appareillage de mesure de température, utilisé principalement dans les thermostats, se base sur la dilatation thermique différentielle de deux lames ou disques faits de métaux différents et reliés ou soudés à leurs extrémités.

### ***1.5 Échelles de température***

On utilise plusieurs échelles de température; parmi celles-ci, l'échelle Celsius, l'échelle Fahrenheit (dans les pays anglo-saxons), l'échelle de température thermodynamique.

L'échelle Celsius, qui fixe la température de congélation de l'eau à 0°C et sa température d'ébullition à 100°C, est utilisée dans le monde entier.

Dans l'échelle Fahrenheit, utilisée dans les pays anglophones pour la vie courante, la température de congélation de l'eau est fixée à 32°F et sa température d'ébullition à 212°F.

Dans le système international SI, l'unité thermique de base est le kelvin (K), unité de température thermodynamique. Jusqu'en 1954, l'échelle de température était définie à partir de l'écart de 100 degrés entre les points de congélation et d'ébullition de l'eau. Cette définition, peu précise, a été remplacée en 1967 par la définition actuelle, qui utilise un point fixe fondamental : le point triple de l'eau. Ainsi, le kelvin est égal à 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. Ce point décrit les conditions de pression et température d'équilibre de l'eau sous ses trois états : liquide, solide et gaz.

La température absolue coïncide avec la température de l'échelle thermodynamique. En cryogénie, où l'on cherche à obtenir des températures aussi basses que 0,00001 K, on utilise la démagnétisation de matériaux paramagnétiques. A l'autre extrémité de l'échelle, des températures momentanées supérieures à 100 millions de K ont été observées lors d'explosions nucléaires.

### ***1.6 Unités de chaleur***

On a vu qu'en physique, la quantité de chaleur est exprimée dans les mêmes unités que l'énergie et le travail, à savoir en joules (J).

On utilise également la calorie (Cal), définie comme la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de 1 g d'eau de 14,5 °C à 15,5 °C sous une pression de 1 atm.

L'énergie mécanique peut être convertie en chaleur par frottement, et le travail mécanique nécessaire pour produire une calorie s'appelle «l'équivalent mécanique de la calorie».

On a :

$$4,1855 \text{ J} = 1 \text{ Cal}$$

Selon la loi de conservation de l'énergie, tout le travail mécanique effectué pour produire de la chaleur par frottement est converti en énergie dans les corps impliqués dans ce travail. Ce fait fut démontré pour la première fois de manière concluante par Joule, qui chauffa de l'eau dans un récipient clos avec des roues à aubes et prouva ainsi que l'élévation de la température de l'eau était proportionnelle au travail exercé en tournant les roues. Dans un moteur à combustion interne, où de la chaleur est transformée en énergie mécanique, la loi de conservation de l'énergie s'applique également. Cependant, une partie de l'énergie est toujours perdue ou dissipée sous forme de chaleur, car aucun moteur n'a un rendement égal à 100 %.

A partir de la calorie, on introduit parfois d'autres unités de quantité de chaleur:

La kilocalorie (kcal) est égale à 1000 calories.

La thermie est égale à 1000 kcal.

Le kilowattheure (kWh) est l'énergie fournie en 3600 secondes par une source d'énergie de puissance égale à 1 kW, soit 1000 J/s. Comme 1 joule équivaut à 0,2389 calories, 1 kWh représente 3.600.000 joules, soit encore 860.112 calories.

En définitive: **1 kWh = 0,86 thermie**

### ***1.7 Notion de capacité thermique massique***

On appelle capacité thermique massique **C** la quantité de chaleur qu'il faut appliquer à 1 kg de matière pour élever sa température de 1 K.

D'après la loi formulée par les chimistes français Pierre Louis Dulong et Alexis Thérèse Petit, les capacités thermiques massiques des éléments solides sont inversement proportionnelles à leurs masses atomiques. Ainsi, le produit de la capacité thermique massique par la masse atomique est constant pour tous les éléments solides.

Du fait qu'un gaz chauffé se dilate, des calories supplémentaires sont nécessaires pour augmenter sa température, puisqu'une partie de cette énergie est utilisée pour la dilatation du gaz. C'est la raison pour laquelle, dans le cas d'un gaz, il faudra distinguer la capacité thermique massique à pression constante **C<sub>p</sub>** et la capacité thermique massique à volume constant **C<sub>v</sub>**. La capacité thermique massique à pression constante sera toujours supérieure à la capacité thermique massique à volume constant.

Dans le système international d'unités, la capacité thermique massique est exprimée en J/(kg . K).

La capacité thermique massique est parfois exprimée en Cal/(g.°C). La capacité thermique massique de l'eau est de 1 Cal/(g.°C); cela signifie qu'il faut apporter 1 Cal à 1 g d'eau pour augmenter sa température de 1°C.

Le tableau I ci-dessous donne les valeurs mesurées à 25°C de quelques substances usuelles.

Tableau I - Capacités thermiques massiques à 25 °C de diverses substances

COMPOSÉ	Cal/(g.°C)	kJ/(kg.K)
Air	0,24	1,01
Aluminium	0,22	0,90
Argent	0,06	0,24
Acier inoxydable	0,12	0,51
Eau (liquide)	1,00	4,18
Bois	0,42	1,76

Si on considère un corps solide S de masse  $m$  kg et de capacité thermique massique  $C_p$  J/(kg . K), et si on lui apporte une quantité de chaleur  $\Delta Q$  J, l'accroissement de la chaleur contenue par le corps est responsable d'une élévation de température  $\Delta T$  °C, donnée par la relation fondamentale:

$$\Delta Q = m C_p \Delta T$$

avec:  $\Delta Q$  en Joules  
 $m$  en kilogrammes  
 $C_p$  en J/(kg . K) ou J/(kg . °C)  
 $\Delta T$  en °C ou K, ce qui est équivalent puisqu'il s'agit d'une différence.

### 1.8 Notion d'enthalpie

On appelle enthalpie, en thermodynamique, la fonction d'état d'un système, définie par la relation:

$$H = U + pV$$

$U$  étant l'énergie interne du système par unité de masse,  
 $p$  et  $V$  étant respectivement la pression et le volume du système.

L'enthalpie s'exprime en Joules par kg (J/kg).

Lors d'une transformation à pression constante, la chaleur reçue par le système correspond à la variation de son enthalpie:

Considérons ainsi un système de volume  $V$  dans un état initial caractérisé par sa pression  $p$ , sa température  $T_0$  et son enthalpie  $H_0$

En lui apportant une quantité de chaleur  $\Delta Q$ , faisons passer ce système dans un état final qui sera caractérisé par la même pression  $p$ , le même volume  $V$ , sa température finale  $T_f$  et son enthalpie  $H_f$

L'enthalpie de ce système a subi une variation:

$$\Delta H = H_0 - H_f = \frac{\Delta Q}{m} = C_p \Delta T$$

Pour un thermicien, l'enthalpie n'est pas autre chose que la chaleur contenue par unité de masse dans un corps solide, ou par  $Nm^3$  dans un gaz.

### 1.9 Chaleur latente de changement d'état

Certains changements physiques sont associés aux changements de température d'un corps. Presque tous les corps se dilatent lorsqu'ils sont chauffés et se contractent en se refroidissant.

La phase d'un corps pur est l'état, solide, liquide ou gazeux qu'il prend selon des conditions de température et de pression.

Le passage d'un corps de l'état solide à l'état gazeux est appelé sublimation, de l'état solide à l'état liquide, fusion et de l'état liquide à l'état de vapeur, vaporisation. Si la pression est constante, ces processus ont lieu à une température constante. Une certaine quantité de chaleur est requise pour réaliser ces trois changements d'état. Elle est appelée chaleur latente. Ainsi il existe des chaleurs latentes de sublimation, de fusion et de vaporisation.

Lorsque l'on fait bouillir de l'eau dans un récipient ouvert à la pression atmosphérique, la température ne dépasse pas  $100^\circ C$ , même si l'on augmente la quantité de chaleur. La chaleur absorbée par l'eau sans changement de température est la chaleur latente; elle est utilisée pour transformer l'eau en vapeur. Elle est récupérée quand la vapeur est condensée pour donner de l'eau.

D'une manière similaire, si un mélange d'eau et de glace est chauffé dans un verre, sa température ne change pas tant que toute la glace n'a pas fondu. La chaleur absorbée est utilisée pour faire fondre la glace.

### 1.10 Flux de chaleur

On appelle flux de chaleur  $\Phi$ , la quantité de chaleur  $\Delta Q$  transférée par unité de temps:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$\Phi$  est un débit de chaleur, et s'exprime en joules par seconde, c'est-à-dire en watt.

Les transferts de chaleur sont mesurés par des flux, et ont les mêmes dimensions qu'une puissance, par exemple électrique.

Pour ce qui concerne les unités d'énergie (ou de chaleur), on a vu précédemment les équivalences:

$$1 \text{ kWh} = 0,86 \text{ thermie} = 0,86 \cdot 1000 \text{ kcal}$$

Pour les unités de puissance (ou de flux de chaleur), il leur correspond les équivalences:

$$1 \text{ W} = 0,86 \text{ kcal/h}$$

### 1.11 *Transferts de chaleur*

On appelle transferts de chaleur, les processus par lesquels de l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ .

La chaleur peut être transmise par *conduction*, *convection* ou *rayonnement*. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs en brique d'une maison; l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection; la Terre reçoit sa chaleur du Soleil en grande partie par rayonnement.

Le flux engendré dans le transfert est proportionnel à la différence de température  $T_1 - T_2$  et à la section de passage  $S$  du flux:

$$\Phi = h S (T_1 - T_2)$$

$h$  s'interprète comme un coefficient d'échange de chaleur.

Cependant, cette relation n'est valable qu'au premier ordre, car le plus souvent, le coefficient  $h$  dépend de la température. On introduira souvent la quantité  $\Phi / S$ , qui est la densité de flux, et qui s'exprime en  $\text{W/m}^2$ . Les différents modes de transferts de chaleur seront étudiés en détail dans la suite de ce cours. Le problème sera de déterminer le coefficient  $h$  dans chacun des modes envisagés ci-après.



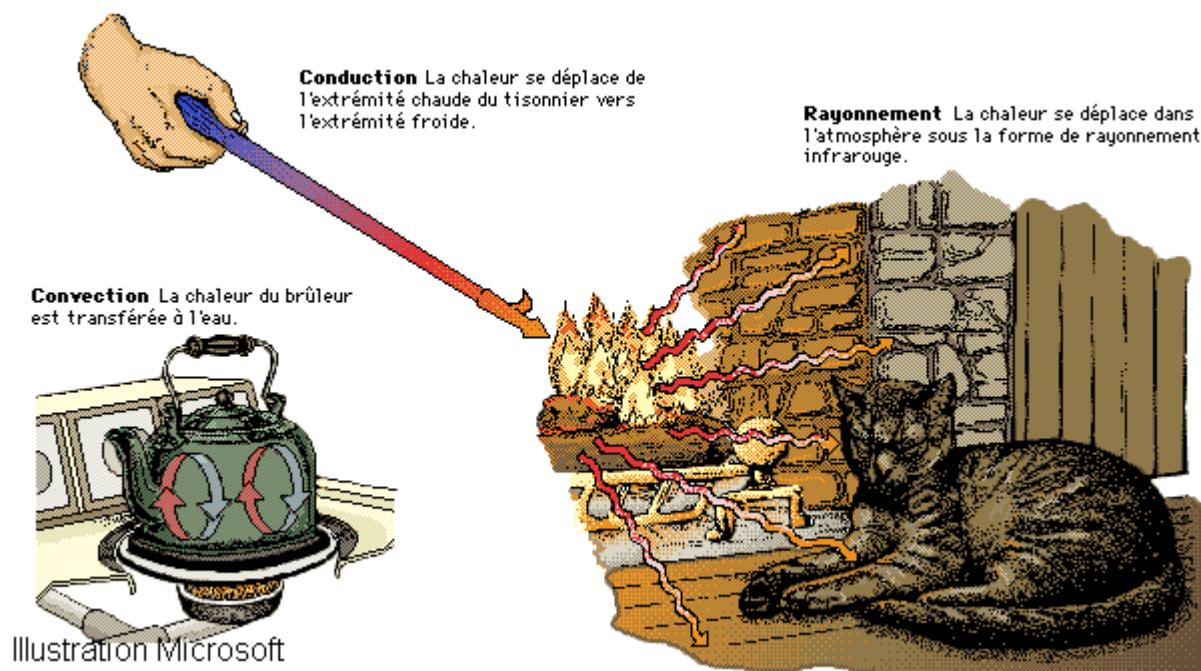


Figure 2 - Modes de transfert de chaleur

### Conduction

Seule la conduction permet un transfert de chaleur efficace à travers les solides opaques. Lorsque l'on chauffe l'une des extrémités d'une barre métallique, la chaleur se transmet par conduction à l'autre extrémité plus froide. Le mécanisme exact de la conduction dans les solides n'est toujours pas totalement élucidé, mais découle surtout du mouvement des électrons libres dans le corps, enclenché dès que s'y établit une différence de température. Ainsi, les bons conducteurs de chaleur sont en général de bons conducteurs électriques.

En 1822, le mathématicien français Joseph Fourier donna une définition mathématique précise de la conduction. D'après la loi de Fourier, la vitesse à laquelle la chaleur est conduite dans un corps par unité de section est proportionnelle à l'opposé du gradient de la température du corps. Le facteur de proportionnalité est la conductibilité thermique du matériau.

Des métaux comme l'or, l'argent et le cuivre ont une conductibilité thermique importante (ils conduisent facilement la chaleur), alors que des matériaux comme le verre et l'amiante ont une conductibilité thermique beaucoup plus faible. Ces derniers sont des isolants.

Dans de nombreuses applications industrielles, il est nécessaire de connaître la vitesse de propagation de la chaleur dans un solide pour une différence de température donnée. On fait alors appel à des techniques de calculs mathématiques sophistiqués, effectués au moyen d'ordinateurs.

## Convection

Dans un champ de gravitation, toute différence de température dans un liquide ou un gaz modifie sa densité, un mouvement se produisant alors au sein du fluide du fait de la poussée d'Archimède. Ce mouvement de brassage, dans lequel les parties les plus chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, s'appelle convection. Le mouvement du fluide peut être *naturel* ou *forcé*.

Les mouvements dus uniquement à des différences de température du fluide constituent la convection naturelle. La convection forcée est obtenue en soumettant le fluide à une augmentation de pression, le mouvement se déclenchant alors selon les lois de la mécanique des fluides.

Exemple de convection naturelle : le chauffage d'une pièce par un radiateur correspond à une élévation d'air chaud le long des murs, l'air plus frais étant aspiré vers le radiateur. L'air chaud ayant tendance à s'élever et l'air frais à descendre, on doit installer les radiateurs près du sol et les appareils de climatisation près du plafond pour garantir une efficacité maximale du dispositif de chauffage. La convection naturelle favorise la montée de l'eau chaude et de la vapeur dans les chaudières, ainsi que le phénomène d'aspiration dans les cheminées. La convection explique également les mouvements des grandes masses d'air autour de la Terre, l'action des vents, la formation des nuages, et les courants océaniques.

## Rayonnement

Le rayonnement est fondamentalement différent des deux autres types de transfert de chaleur, en ce sens que les substances qui échangent de la chaleur n'ont pas besoin d'être en contact l'une avec l'autre. Elles peuvent même être séparées par le vide.

Le rayonnement est l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chauffé, une explication générale du phénomène étant fournie par la théorie quantique. En 1900, le physicien allemand Max Planck utilisa la théorie quantique et le formalisme mathématique de la mécanique statistique pour vérifier la loi fondamentale du rayonnement, dite loi de Stefan. L'expression mathématique de cette loi indique que la puissance totalement émise (toutes longueurs d'onde comprises) par un corps chauffé est proportionnelle à  $T^4$ ,  $T$  étant la température absolue du corps. Seul un corps noir émet un rayonnement qui satisfait exactement à la loi de Planck, les corps réels émettant avec une puissance inférieure à celle que prévoit la loi de Stefan.

La contribution de toutes les fréquences à l'énergie de rayonnement est appelée pouvoir d'émission du corps : c'est la quantité d'énergie émise par unité de surface et par unité de temps. Le facteur de proportionnalité de la loi de Stefan est appelé constante de Stefan-Boltzman, du nom des deux

physiciens autrichiens Josef Stefan et Ludwig Boltzmann, qui, respectivement, en 1879 et en 1884, découvrirent la relation entre le pouvoir d'émission et la température. Ainsi, plus la température est élevée, plus la puissance émise est importante. Outre l'émission, toutes les substances sont également capables d'absorber un rayonnement.

Les surfaces opaques peuvent absorber ou réfléchir les rayonnements incidents. En général, les surfaces mates et rugueuses absorbent mieux le rayonnement que les surfaces brillantes et polies. À l'inverse, les surfaces brillantes réfléchissent mieux le rayonnement que les surfaces mates. Les corps dotés d'un bon pouvoir d'absorption sont également de puissants émetteurs de chaleur, alors que les bons réflecteurs sont de mauvais émetteurs. Par conséquent, les ustensiles de cuisine sont dotés de fonds mats pour une bonne absorption de la chaleur et de côtés polis pour une émission minimale, afin d'améliorer les transferts de chaleur.

On observe que les capacités d'absorption, de réflexion et de transmission d'une substance dépendent de la longueur d'onde du rayonnement incident. Le verre, par exemple, transmet de grandes quantités de rayonnement ultraviolet (ondes courtes), mais transmet mal le rayonnement infrarouge (ondes longues).

La *loi de déplacement de Wien*, nommée d'après le physicien allemand Wilhelm Wien, est une expression mathématique de la sélectivité du rayonnement : le produit de la longueur d'onde d'énergie maximale, exprimée en mètres, et de la température du corps en degrés Kelvin est égal à une constante qui vaut environ  $2,897 \times 10^{-3}$  m.K. Cela explique en partie l'effet de serre.