

Il peut être comparé à la circulation d'un liquide entre deux vases communicants, qui est d'autant plus rapide que la différence de niveau est importante.

Le sens de l'échange est aussi fonction du sens de l'écart de température, et par la même réversible.

La figure ci-dessous illustre ces phénomènes.

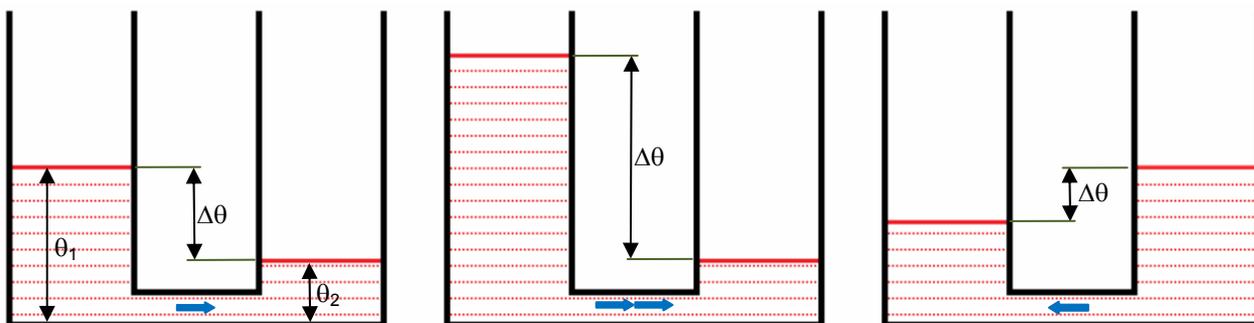


Fig. 9.1-1

avec  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$

L'échange tend à réduire l'écart de température  $\Delta\theta$  des corps jusqu'à l'égalisation.

Notons que l'échange thermique se produit aussi bien entre deux corps solides qu'entre un solide et un fluide tel que l'air ou l'eau. Ainsi, l'ampoule électrique chauffe aussi bien l'air voisin que son support.

## 9.1.2. Les modes de transfert thermique

Lorsque l'on met en présence deux corps de températures différentes, ils échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à atteindre un état d'équilibre qui se traduit par l'uniformisation de leurs températures.

Ces échanges thermiques sont de trois types :

- rayonnement
- convection
- conduction

### 9.1.2.1. Le rayonnement

Tous les corps matériels de température supérieure au zéro absolu ou  $0^\circ$  Kelvin qui correspond à  $-273^\circ$  Celsius, émettent des ondes électromagnétiques; on dit qu'ils émettent un rayonnement thermique constitué d'ondes et de corpuscules: lumière, infrarouge, ultraviolet, etc..

Le rayonnement croît avec la température du corps. Il devient nul lorsque la température s'abaisse jusqu'au zéro absolu, valeur où l'agitation moléculaire est elle-même nulle.

Il en résulte qu'un corps dont la température est différente de  $0^\circ$  K émet toujours de l'énergie même s'il se trouve en présence d'un corps plus chaud que lui.

En plus, au processus d'émission de rayonnement thermique s'ajoute un processus d'absorption des radiations électromagnétiques provenant de l'environnement de ces corps. Leur état thermique est alors régi par le bilan des processus d'émission et d'absorption.

Le rayonnement thermique correspond à un transfert de chaleur ne nécessitant aucun support matériel, c'est ainsi que la terre est chauffée par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagé dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe.

Il est intéressant de remarquer que les nuages formés par la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, absorbent partiellement les rayons du soleil ce qui réduit en conséquence la température.

La figure ci-dessous illustre le transfert d'énergie par rayonnement thermique entre deux corps.

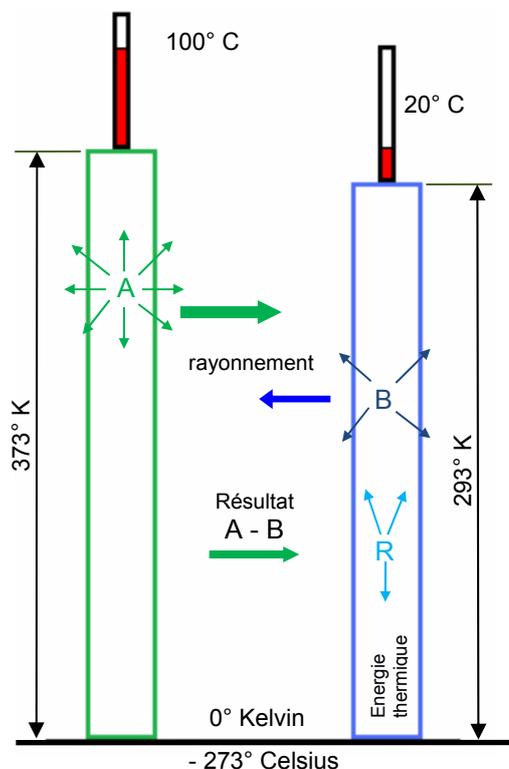


Fig. 9.1-2

Le corps A dont la température absolue est supérieure à celle du corps B émet plus qu'il ne reçoit. L'échange thermique correspond à la différence des deux rayonnements, le corps A chauffant le corps B.

Même lorsque l'équilibre thermique est atteint, donc la température des corps identique et  $T_A = T_B$ , l'échange continue, chaque corps rayonnant et absorbant la même énergie.

Le rayonnement dépend également de la couleur du corps, de sa surface et de son état (poli, rugueux).

Lorsque l'énergie rayonnée rencontre un autre corps, elle est partiellement réfléchi, tandis que la partie absorbée chauffe ce dernier.

Un corps absorbe une part d'autant plus faible de l'énergie reçue par rayonnement, que sa surface est claire et brillante, ce qui est évident pour la lumière mais est également vrai pour les rayonnements non visibles. Un corps noir et mat est, inversement, le meilleur absorbant du rayonnement calorifique. Il est aussi celui qui a le meilleur pouvoir émissif, à température égale. C'est pourquoi la référence physique d'échange par rayonnement est le corps noir; en pratique, une surface recouverte de noir de fumée.

Les applications pratiques sont nombreuses:

- poêle à charbon peint en noir mat,
- barreau de graphite utilisé comme résistance dans certains fours (celui-ci émet mieux que s'il était remplacé par un barreau métallique porté à la même température),
- une opération favorable aux économies d'énergie consisterait à peindre les radiateurs de chauffage central en noir mat : ils émettraient plus de chaleur rayonnée pour une température d'eau identique et la température des pièces gagnerait quelques degrés.

Vous trouverez dans le tableau ci-dessous, quelques coefficients d'échange par rayonnement exprimés par rapport au corps noir. Ces valeurs numériques de l'émissivité hémisphérique totale correspondent à de faibles températures de surface (20 °C).

Matériaux	Etat de surface	$\epsilon$
<b>Fer</b>	Poli	<b>0,17</b>
<b>Aluminium</b>	Poli	<b>0,06</b>
	Oxydé	<b>0,30</b>
<b>Cuivre</b>	Poli	<b>0,04</b>
	Très oxydé	<b>0,75</b>
<b>Or</b>	Pur très poli	<b>0,02</b>
<b>Zinc</b>	Pur très poli	<b>0,02</b>
	Galvanisé	<b>0,20 - 0,30</b>
<b>Carbone</b> (dépôt noir de fumée)		<b>0,95 - 0,98</b>
<b>Peinture</b>	Aluminium	<b>0,30 - 0,60</b>
	Laque noire mate	<b>0,97</b>
	Laque noire brillante	<b>0,87</b>
	Peinture à l'huile toutes couleurs	<b>0,92 - 0,96</b>
<b>papier</b>		<b>0,95</b>
<b>Bois</b>	Suivant essences	<b>0,75 - 0,95</b>
<b>Verre ordinaire</b>		<b>0,94</b>

Puissance échangée :

La valeur de la puissance rayonnée émise par un corps à la température  $T_1$  est donnée par la relation :

$$\Phi_1 = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot T_1^4$$

La valeur de la puissance absorbée par le corps dans un environnement à la température  $T_2$  est égale à :

$$\Phi_2 = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot T_2^4$$

La puissance totale échangée entre le corps et son environnement s'exprime alors par :

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

- avec
- $T_1^4$  et  $T_2^4$  les températures exprimées en °K
  - S la surface du corps en m<sup>2</sup>
  - $\epsilon$  une constante sans dimension appelée émissivité, comprise entre 0 et 1 et dépendant de la surface du corps.
  - $\sigma$  une constante appelée constante de Stefan-Boltzman qui vaut  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Résistance thermique associée au rayonnement :

On démonte que lorsque  $(T_1 - T_2)$  est très inférieur à  $T_2$ , qu'il est possible d'associer au rayonnement à travers un système  $(S, \epsilon, \sigma)$ , une résistance thermique de valeur égale à :

$$R_{rr} = \Delta T / \Phi = 1 / 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot S \cdot T^3$$

**9.1.2.2. La convection**

La convection apparaît comme une voie d'échange thermique entre deux corps de phases différentes. Ce phénomène correspond au transfert de chaleur depuis le corps chaud vers le corps le plus froid. Le transfert inverse (fluide chaud et en mouvement vers un corps plus froid) peut aussi exister. Il intervient aussi bien à la surface de séparation entre un solide et un fluide (gaz ou liquide), qu'à la surface libre entre un liquide et un gaz. C'est un transfert de chaleur **avec transfert de matière**.

Les molécules du fluide s'échauffent au contact du corps solide dont nous supposons la température plus élevée. Elles se dilatent et leur densité diminue. Même en l'absence de dispositifs externes, la poussée d'Archimède tend à entraîner les molécules du fluide vers le haut. Celles-ci en s'élevant vont laisser la place à d'autres qui vont s'échauffer à leur tour. Ainsi se crée un courant permanent qui évacue continuellement l'énergie calorifique d'un corps chaud. En régime permanent, la poussée verticale s'équilibre avec les forces de frottements qui s'exercent sur le fluide, en particulier celle due au contact fluide/corps solide.

C'est la **convection naturelle**.

Les courants de convection naturelle sont ascendants au voisinage d'un corps dont la température est plus élevée que celle du fluide.

Inversement, les courants de convection seraient descendants si le fluide apportait de la chaleur à un corps solide plus froid que lui.

La figure ci-dessous montre la circulation des courants de convection naturelle.

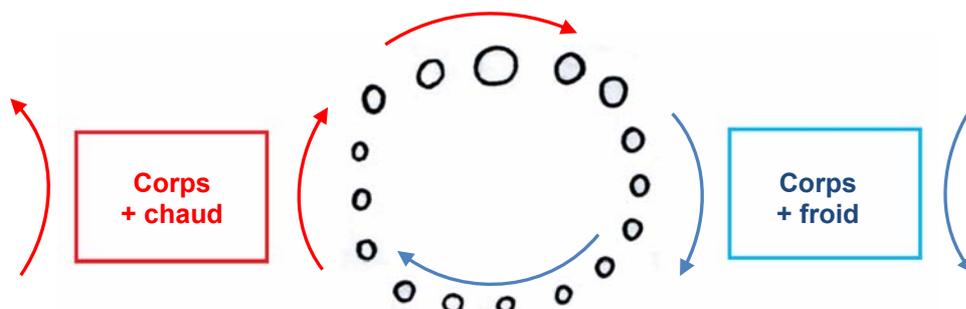


Fig. 9.1-3

Ces courants de convection sont très perceptibles par exemple au-dessus d'un radiateur ; ce sont eux qui assurent le tirage d'une cheminée.

La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

- la différence de température entre le corps chaud et le fluide,
- la vitesse du fluide,
- la capacité thermique massique du fluide,
- la surface d'échange,
- l'état de surface,
- la hauteur du corps.

La convection est d'autant plus active que l'écart de température est élevé et que la mobilité du fluide est grande, mais elle est freinée par tout obstacle à la circulation des courants de convection. La quantité d'énergie transmise augmente avec la surface d'échange mais dépend de son orientation et même de sa forme.

Ainsi la face supérieure d'un boîtier dissipe plus qu'une face latérale de mêmes dimensions qui évacue elle-même mieux que la face inférieure.

La figure 9.1-4 ci-dessous illustre cette particularité.

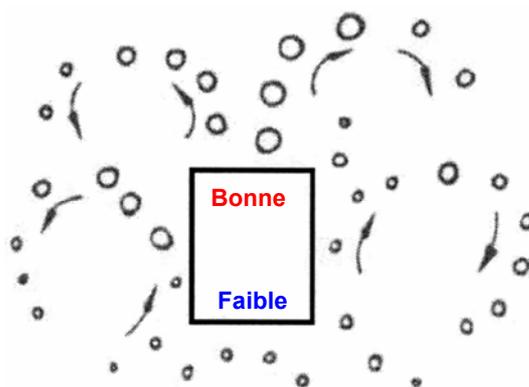


Fig. 9.1-4

On voit alors que l'état de surface du corps et sa position sont importants. Ainsi, les phénomènes de convection naturelle sont bien plus importants pour une plaque disposée verticalement que pour la même plaque disposée horizontalement.

L'emploi d'un radiateur à ailettes, grâce à la multiplicité des arêtes et des surfaces, permet d'améliorer l'échange dans un volume identique.

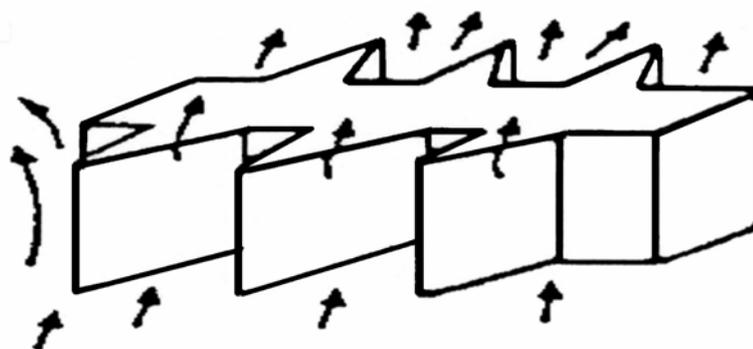


Fig. 9.1-5

Lorsqu'un appareil est monté dans un coffret fermé, la convection intervient deux fois pour évacuer l'énergie calorifique qu'il dégage :

- une première fois, par l'intermédiaire de l'air contenu dans le coffret qui prend de la chaleur à l'appareil (courant de convection ascendant) puis la restitue à la tôle du coffret (courant descendant).
- une seconde fois, grâce à l'air extérieur qui prend la chaleur du coffret (courant ascendant renouvelé).

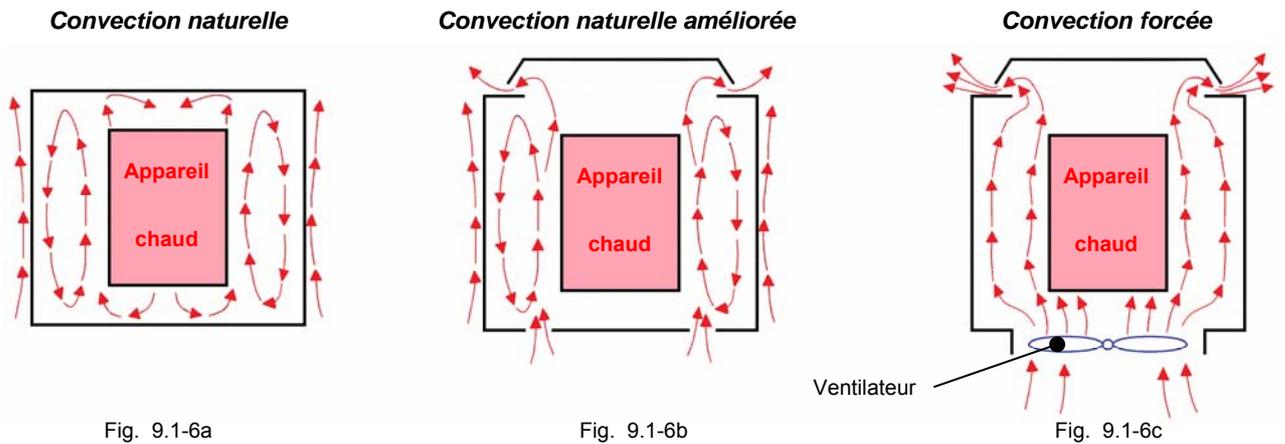
Le refroidissement du matériel monté dans un coffret est amélioré en disposant des ouvertures en bas et en haut qui permettent la traversée d'un flux d'air extérieur frais.

C'est la **convection naturelle améliorée**.

Le résultat est encore amélioré lorsque le mouvement du flux d'air de refroidissement est accéléré artificiellement par un ventilateur.

On parle alors de **convection forcée**.

Exemples de convections d'un appareil en coffret



Puissance transmise :

C'est la loi de Newton qui permet de calculer le flux de chaleur exprimé en watts (ou puissance échangée) entre une surface solide de valeur S et de température  $\Theta_S$  et un fluide de température  $\Theta_F$  (en supposant que  $\Theta_S > \Theta_F$ ). Elle s'exprime par la relation (loi de Newton) :

$$\Phi = h \cdot S \cdot \Delta\theta$$

- avec
- S la surface d'échange en  $m^2$
  - $\Delta\theta = \Theta_S - \Theta_F$  la différence de température entre le corps et le fluide en  $^{\circ}C$  ou  $^{\circ}K$
  - h désigne le coefficient d'échanges superficiels entre le fluide et la surface en  $W m^{-2} K^{-1}$

Avec un corps solide et différents fluides, les ordres de grandeur du coefficient h sont les suivants :

Air en convection naturelle	10 $W m^{-2} K^{-1}$
Air en convection forcée	100 $W m^{-2} K^{-1}$
Eau en convection forcée	1000 $W m^{-2} K^{-1}$

Remarque :

Le brassage du fluide au niveau de la surface de contact conditionne l'efficacité plus ou moins grande des échanges, donc la valeur h, coefficient d'échanges superficiels.

Résistance thermique associée au rayonnement :

On peut également faire intervenir la notion de résistance thermique, celle-ci s'exprime alors par la relation suivante :

$$R_{tcv} = \Delta T / \Phi = 1 / h \cdot S$$

### 9.1.2.3. La conduction

On sait que:

- les molécules et atomes sont en perpétuelle agitation thermique se traduisant par :
  - soit des oscillations autour des positions d'équilibre pour les corps solides et les liquides
  - soit des déplacements désordonnés pour les gaz
- à cette agitation thermique est associée une énergie (agitation thermique) proportionnelle à la température  $T$ .
- les molécules sont en perpétuelle interaction les unes avec les autres et qu'au cours de ces chocs, elles échangent de l'énergie. Il en résulte, qu'une molécule "excitée" peut ainsi perdre un peu de son énergie au profit de ses voisines avec lesquelles elle interagit.

La figure ci-dessous illustre ce phénomène de transfert d'énergie.

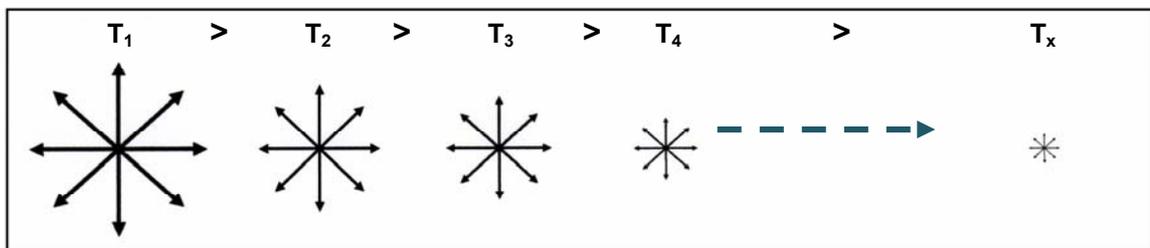


Fig. 9.1-7

Au cours du transfert d'énergie :

- la molécule 1 va choquer la molécule 2 et globalement lui céder une partie de son énergie,
- la molécule 2 va choquer à son tour la molécule 3, et ainsi de suite...

Une partie de l'énergie de la molécule 1 va ainsi être transférée vers la droite, vers les molécules moins excitées (donc de température inférieure) et ceci sans déplacement de cette molécule 1.

Le transfert de chaleur s'effectue donc **sans transfert de matière** et n'intéresse que les corps solides.

De même que pour le courant électrique, la circulation est d'autant plus facile que la distance est courte et la section de passage importante. Elle est, bien entendu, activée par l'écart de température.

Remarque :

- 1) les molécules effectuant un très grand nombre de chocs, les transferts d'énergie sont donc des bilans sur l'ensemble des chocs.
- 2) Des molécules de même excitation (donc de même température) échangent de l'énergie lors des chocs, mais le bilan est nul les transferts étant équivalents de chaque côté.

Notion de conductivité thermique

La **conductivité thermique**  $\lambda$  est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température.

Dans le Système International d'unités, la conductivité thermique  $\lambda$  est exprimée en watts par mètre-kelvin, ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) où :

- le watt est l'unité de puissance
- le mètre est l'unité de longueur
- le kelvin est l'unité de température

En général, la conductivité thermique va de pair avec la conductivité électrique. Par exemple, les métaux, bons conducteurs d'électricité sont aussi de bons conducteurs thermiques. De même que pour l'électricité, la circulation est d'autant plus facile que la distance est courte et la section de passage importante. Elle est, bien entendu, activée par l'écart de température.

Il y a des exceptions, la plus exceptionnelle est celle du diamant qui a une conductivité thermique élevée, entre 1000 et 2600  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , alors que sa conductivité électrique est basse.

Enfin, pour la plupart des matériaux, la conductivité thermique diminue légèrement quand la température s'élève.

Conductivité thermique de quelques matériaux communs en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Vous trouverez dans le tableau ci-dessous, les ordres de grandeur des conductivités thermiques  $\lambda$  de quelques matériaux communs.

<b>Matériaux</b>	<b><math>\lambda</math></b>
<b>Argent</b>	<b>418</b>
<b>Cuivre</b>	<b>390</b>
<b>Or</b>	<b>317</b>
<b>Aluminium (pureté 99,9%)</b>	<b>237</b>
<b>Platine</b>	<b>71,6</b>
<b>Acier doux</b>	<b>46</b>
<b>Quartz</b>	<b>8</b>
<b>Verre</b>	<b>1,20</b>
<b>Eau</b>	<b>0,585</b>
<b>Laine</b>	<b>0,050</b>
<b>Polystyrène expansé</b>	<b>0,036</b>
<b>Air sans convection</b>	<b>0,026</b>

Puissance transmise :

Considérons deux parois distantes d'une longueur  $l$ , l'une à la température  $T_1$  et l'autre à la température  $T_2$ . Si l'on suppose par hypothèse que  $T_1 > T_2$ , la chaleur va se propager de la face 1 à la face 2.

Le flux thermique  $\Phi$  qui traverse la surface  $S$  à l'instant  $t$  est donné par la loi de Fourier :

$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S}{l} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{\lambda \cdot S}{l} \cdot \Delta T$$

avec

- $\lambda$  la conductivité thermique en  $W.m^{-1}.K^{-1}$
- $S$  la surface d'échange en  $m^2$
- $l$  la distance entre les deux parois
- $\Delta T$  l'écart de température entre les parois 1 et 2

Résistance thermique associée à la conduction :

On peut aussi faire intervenir la notion de résistance thermique, celle-ci s'exprime par la relation suivante :

$$R_{cd} = \Delta T / \Phi = l / \lambda \cdot S$$

Exemples d'applications :

Dans le domaine industriel, le fer à souder est une application simple de la conduction calorifique. La conduction chauffe l'extrémité de la panne qui atteint la température de fusion de la soudure, bien qu'elle ne soit pas chauffée directement; mais celle-ci serait moins chaude si elle n'était pas en cuivre.

C'est encore la conduction, à travers la tôle, qui permet à l'énergie calorifique, apportée sur la face interne des parois d'un coffret par convection, de gagner la face externe où elle sera évacuée à nouveau par convection.

Dans la pratique, le refroidissement fait appel simultanément aux trois processus d'échanges thermiques que nous venons de distinguer. Ainsi, un appareil en coffret ou armoire évacue son énergie calorifique :

- par convection comme nous l'avons vu précédemment, mais encore ...
- par rayonnement, lequel est absorbé d'une part, par l'air interne (qui s'échauffe aussi par ce moyen) et, d'autre part par l'enveloppe (coffret ou armoire).
- par conduction vers la paroi arrière sur laquelle il est fixé.

Il est intéressant d'examiner le cas de la bouteille isotherme.

Elle est constituée d'une bouteille en verre à double couche équivalente à deux bouteilles à parois minces imbriquées l'une dans l'autre. Les parois internes en vis-à-vis sont argentées, car ainsi la paroi la plus interne renvoie mal la chaleur qu'elle reçoit du liquide chaud contenu à l'intérieur, et la paroi externe renvoie le peu qu'elle reçoit. D'autre part, le vide est pratiqué entre les deux parois, afin d'éviter l'échange par convection qui apparaîtrait s'il y avait de l'air. De plus la conductibilité du verre est faible ; c'est pourquoi il est employé malgré sa fragilité. Le tout est recouvert d'une enveloppe protectrice (métal ou plastique).

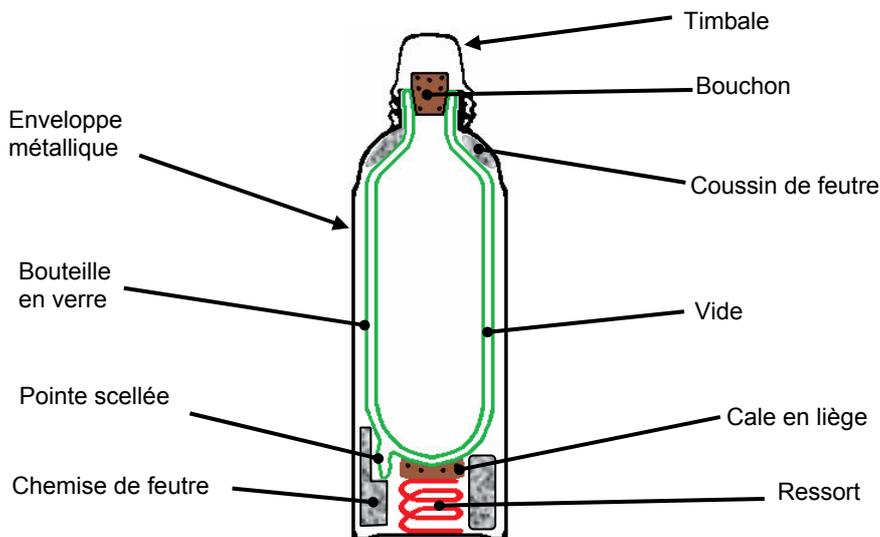


Fig. 9.1-8

Du fait de ses propriétés d'isolation thermique, la bouteille isotherme conserve fort longtemps la température du liquide qu'elle contient qu'il soit chaud ou froid.

Remarque :

Dans le domaine domestique, on utilise inversement la faible conductivité thermique de certains matériaux (polystyrène, laine de verre, etc...) pour procéder à l'isolation :

- des murs d'habitations et des tuyauteries afin de limiter les déperditions d'énergie (murs sandwichs, double ou triple vitrage, calorifugeage des tuyauteries, etc...)
- de certains appareils électroménagers (réfrigérateurs, congélateurs, fours, etc...)

**9.1.2.4. Analogie entre le domaine thermique et le domaine électrique**

Considérons un organe électrique en service continu et stable. Il dissipe, sous forme de pertes, une puissance constante P transformée en un flux de chaleur  $\Phi$ . Ses pièces de surface atteignent au bout d'un temps une température fixe que nous pouvons mesurer. Il en résulte un échauffement  $\Delta T$  par rapport à la température ambiante qui n'a pas varié.

Dans cette situation d'équilibre, l'énergie échangée avec l'extérieur de l'organe est égale à l'énergie représentée par les pertes.

Comme nous avons défini des coefficients fixes pour tous les échanges thermiques, le bilan énergétique global peut également s'écrire sous une forme linéaire.

$$\Delta T = R_{th} \cdot P$$

Cette formule est tout à fait comparable à celle de la loi d'Ohm.

$$U = R \cdot I$$

Effectivement,  $\Delta T$  a la nature d'une tension ou d'une "différence de potentiel" U et  $R_{th}$  a celle d'une résistance électrique R ; quant à P, elle correspond à un débit ou à un écoulement de chaleur semblable à l'intensité de courant électrique I.

Domaine électrique :

- I :  $\Rightarrow$  intensité ou flux de courant en ampères (A).
- U :  $\Rightarrow$  tension ou différence de potentiel en volts (V).
- R :  $\Rightarrow$  résistance électrique en ohms ( $\Omega$ ).

Domaine thermique :

- P :  $\Rightarrow$  puissance échangée en watts (W).
- $\Delta T$  :  $\Rightarrow$  différence de température exprimée indifféremment en degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ou en degrés Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- $R_{th}$  :  $\Rightarrow$  résistance thermique en degrés Celsius par watt ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ).

Ainsi, en régime stabilisé, si nous connaissons l'élévation  $\Delta T$  de température et la puissance dissipée P d'un corps, nous pourrions en déterminer la résistance thermique par la relation :

$$R_{th} = \Delta T / P$$

### 9.1.2.5. Organe électrique monté dans une enveloppe (moteurs, appareillage en coffret ou armoire)

Nous avons vu que, dans ce cas, l'énergie calorifique produite est évacuée par 2 convections successives avec le coffret comme intermédiaire, et qu'il en est de même pour les autres voies d'échange, rayonnement et conduction.

Cet obstacle augmente la résistance thermique  $R_{th}$  que le même appareil présentait à l'air libre ou, si on l'évalue séparément, constitue une nouvelle résistance thermique  $R'_{th}$  qui s'ajoute à la première, de façon similaire à l'association de résistances électriques en série dans la loi d'Ohm.

### 9.1.2.6. Définition de la température ambiante

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons mis en évidence que la résistance thermique détermine l'élévation de température  $\Delta T$  nécessaire pour évacuer les pertes d'un appareil. Cette valeur est la même qu'elle soit exprimée en degrés Kelvin ou en degrés Celsius. Désormais, nous utiliserons cette dernière échelle plus fréquemment utilisée en pratique pour caractériser les constituants industriels soit  $\Delta T = \Delta\theta$ . L'échauffement  $\Delta\theta$  est comptée à partir de la température  $\theta_a$  d'un environnement dont l'inertie thermique est considérée comme infinie, de telle sorte que  $\theta_a$  ne soit pas modifiée par les pertes de l'appareil.

Des considérations précédentes il en résulte la règle suivante :

*La température ambiante à considérer pour un appareil est celle de l'endroit où il doit être installé compte-tenu de l'influence de tous les autres organes en fonctionnement mais en excluant la contribution thermique propre de l'appareil en question.*

Il en va de même pour l'installation d'une armoire ou d'un coffret dans un local renfermant d'autres ensembles susceptibles de fournir un apport thermique.

Dans ces conditions, la température  $\theta$  atteinte par l'appareil répond à la formule :

$$\theta = \theta_a + R_{th} \cdot P$$

En pratique,  $\theta_a$  doit être mesurée en l'absence des pertes  $P$ , ou à une distance suffisante pour que leur influence soit négligeable.

### 9.1.2.7. Exemples d'applications

Considérons un contacteur ayant seulement sa bobine sous tension.

#### Exemple 1

Supposons que :

- La température maximale au cœur de la bobine du contacteur atteint  $\Theta_M = 130^\circ\text{C}$  (température maximale autorisée par les isolants choisis), quand la bobine dissipe une puissance de 10 W et que la température ambiante est de  $\Theta_a = 60^\circ\text{C}$ ,
- Le contacteur est à l'air libre.

Quels sont les échanges de température ?

Réponse :

La température extérieure étant inférieure à la température du contacteur, il y aura un écoulement du flux de chaleur de la bobine vers l'extérieur.

Le contacteur étant placé dans l'air ambiant, il n'y a pas d'autre barrière thermique qui s'oppose à l'écoulement de ce flux, que celle présentée par la capacité de dissipation de la bobine elle-même.

Dans l'exemple choisi :

$$R_{th} = (\theta_M - \theta_a) / P \Rightarrow R_{th} = (130 - 60) / 10 = 70 / 10 \text{ soit finalement}$$

$$R_{th} = 7^\circ\text{C/W}$$

### Exemple 2

Imaginons maintenant que le même contacteur soit placé dans un coffret. Dans ce nouveau cas, l'enveloppe du coffret forme écran et introduit une résistance thermique supplémentaire que nous supposons de  $2^\circ\text{C/W}$ .

Réponse :

Reprenons la loi d'échange :

$$\Delta\theta = R_{th} \cdot P$$

Dans ce cas, la résistance thermique équivalente est égale à la somme des résistances thermiques du contacteur et du coffret soit :  $R_{th}$  est égal maintenant à :

$$R_{th} = \Sigma (R_{th}) = 7 + 2 = 9^\circ\text{C/W}$$

On obtient alors l'élévation de température occasionnée par la dissipation de puissance de la bobine :

$$\Delta\theta = 9 \times 10 = 90^\circ\text{C}$$

Si la température maximale de la bobine ne doit toujours pas dépasser  $130^\circ\text{C}$ , la température ambiante acceptable n'est plus que de :

$$\theta_a = 130 - 90 = 40^\circ\text{C}$$

## 9.1.3. Echauffement limite

### 9.1.3.1. Généralités

Il correspond à la température stabilisée maximale d'un appareil lors d'un fonctionnement continu.

Considérons un conducteur de résistance  $R$ , qui peut être une pièce conductrice d'un contacteur, parcourue par un courant constant  $I$ . Suivant la loi de Joule, la quantité d'énergie électrique transformée en chaleur dans ce conducteur s'exprime par la relation :

$$E_e = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\text{avec} \left\{ \begin{array}{l} E_e : \text{ énergie électrique en Joules.} \\ R : \text{ résistance du circuit en ohms} \\ I : \text{ intensité du courant en ampères} \\ \Delta t : \text{ temps écoulé en secondes} \end{array} \right.$$

Simultanément, par le processus de refroidissement que nous avons examiné précédemment, une quantité de chaleur est évacuée à travers la résistance thermique  $R_{th}$  existante entre le conducteur et le milieu ambiant. En conséquence, il en résulte une élévation  $\Delta\theta$  de température de ce conducteur. La quantité de chaleur évacuée peut être calculée comme suit :

$$Q = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \cdot \Delta t \quad (2)$$