

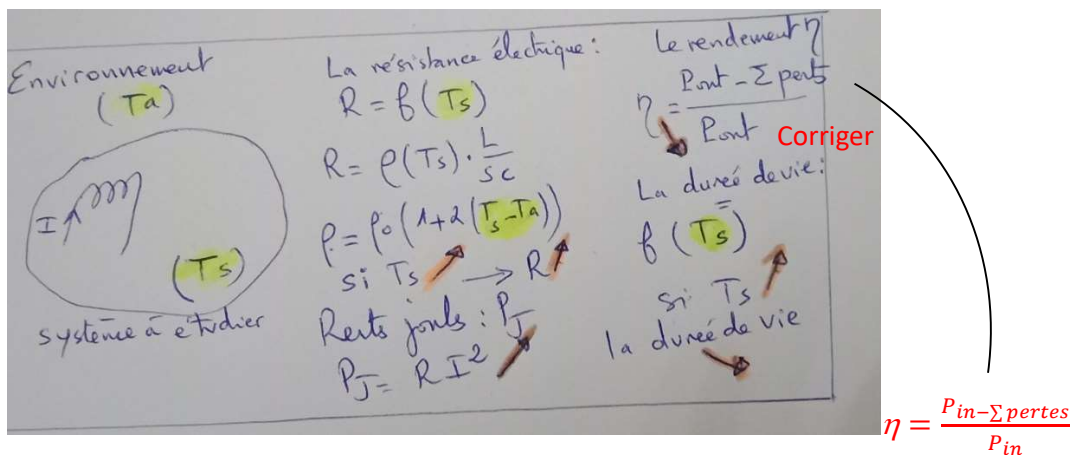
Chapitre I

Généralités sur les transferts de chaleurs

I.0 Introduction générale

L'étude des transferts thermiques est indispensable dans tous les domaines des sciences de l'ingénieur, notamment dans les domaines de la conversion d'énergie et des systèmes embarqués. En effet, l'un des objectifs de l'étude des transferts thermiques, dans un système donné, consiste à déterminer la température dans différents points de ce système. La connaissance de cette dernière est nécessaire afin d'optimiser l'efficacité énergétique et d'assurer la sécurité de fonctionnement.

Nous expliquons, par le croquis ci-dessous, comment une température de fonctionnement élevée d'un système présentant des éléments électriques, peut affecter le rendement et la durée de vie du système.



En résumé, l'étude des transferts thermique permet non seulement d'augmenter l'efficacité et la durabilité des systèmes mais aussi d'assurer la sécurité et la stabilité des systèmes.

I.1 Définitions

a) La thermodynamique

C'est une branche de la physique qui étudie les relations entre la chaleur, l'énergie et les transformations de l'état de la matière (liquide gaz solide). Elle cherche à comprendre comment l'énergie se convertit d'une forme à une autre et comment.

La notion de chaleur est définie, par la thermodynamique, comme une forme transitoire d'énergie qui se propage suite d'une différence de température entre :

- deux parties d'un système quelconque ;
- le système et son environnement ;
- deux systèmes séparés par un milieu matériel ou pas (vide).

b) Température

Plusieurs définitions peuvent être attribuées à la notion de température.

Physiquement, il s'agit d'un paramètre thermodynamique traduisant, l'état énergétique de la matière, elle mesure le degré de l'agitation thermique des particules qui constitue la matière (atomes molécules).

Pratiquement, elle exprime la quantité de chaud ou de froid qu'on peut attribuer à un corps quelconque solide, liquide ou gaz.

Ils existent plusieurs échelles de température. On retient deux :

- Echelle de température absolue noté T [°K] qui est celle retenue dans le Système International (SI) ;
- Echelle en degrés Celsius noté θ [°C] utilisée dans la pratique quotidienne.

On rappelle $T = \theta + 273,15$

c) Champ de température

Les observations pratiques ou les mesures expérimentales ont conduit à la conclusion, qu'à chaque point d'un espace matériel, on a **une seule valeur de la température**. Donc d'un point de vue mathématique, on dit que la température est représentée par un champ scalaire noté : $T = T(x, y, z, t)$

Avec x, y, z les coordonnées d'un point donné et t , le temps (s).

La détermination du champ de température T dans un corps qui subit un processus de transfert thermique représente un des objectifs principaux de l'analyse de ce processus.

d) Surfaces isothermes

Une surface isotherme représente le lieu géométrique des points matériels ayant la même température.

Une surface isotherme peut –être stationnaire (pas de modification avec le temps) ou instationnaire dans le cas contraire (varie avec le temps).

Les surfaces isothermes ne peuvent pas se croiser, par ce qu'un point ne peut avoir deux températures différentes.

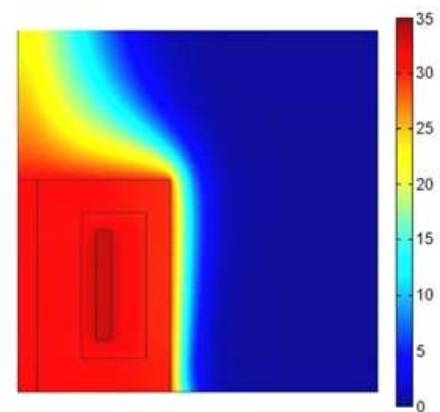


Fig I.1 ligne isothermes

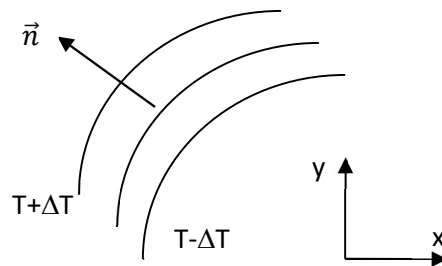
e) Gradient de température

Dans un corps quelconque la variation de température notée ΔT se produit dans les directions qui traversent les surfaces isothermes. La différence de la température la plus importante rapportée à l'unité de longueur est observée dans la direction normale à la surface isotherme.

L'augmentation de T dans cette direction est caractérisée par le gradient de T

$$\overrightarrow{\text{grad}} T = \vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial n} \vec{n}$$

Le $\overrightarrow{\text{grad}} T$ décrit comment la température varie dans l'espace : $\left\{ \begin{array}{l} - \text{à quelle vitesse ;} \\ - \text{dans quelle direction} \end{array} \right.$



f) Energie – chaleur

L'énergie-chaleur représente une forme d'interaction énergétique entre un système thermodynamique et son milieu extérieur, traduite par la variation de température du système. Elle se produit sans modification des frontières du système (sans travail mécanique $W=0$).

Expérimentalement, on a constaté que la chaleur échangée (Q_{12}) par un système qui évolue entre deux états d'équilibres notées (1) et (2) et son milieu externe, est proportionnelle à la masse m du système, à $\Delta T=(T_2-T_1)$ et à la chaleur massique C :

$$Q_{12} = \int_1^2 \delta Q = m \cdot C \cdot (T_2 - T_1) \quad [\text{J}]$$

La chaleur massique appelé aussi chaleur spécifique ou capacité thermique massique [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{K})$], reflète la capacité d'un matériau à **accumuler** de l'énergie sous forme de **chaleur** pour une masse donnée quand sa température augmente .

Exemple de valeur de la chaleur massique à 20°C [SI] :

Air (sec)	Cu	Fe	Al	Résine époxy
1005	385	444	897	1300

Une grande valeur de la chaleur massique, implique qu'une grande quantité d'énergie peut-être stockée moyennant une petite variation de température.

g) Flux thermique total

Le flux thermique total noté ϕ représente la quantité de chaleur transférée à travers une surface donnée par unité de temps :

$$\phi = \frac{\delta Q}{dt} \quad [\text{J/s}] = [\text{W}]$$

Il se mesure en Watt, d'où l'appellation de la puissance thermique.

h) Flux thermique surfacique ou densité de flux thermique

Il est noté φ et défini par :

$$\varphi = \frac{d\phi}{ds} \quad [W/m^2]$$

Si le flux thermique est uniforme sur la surface s on peut écrire :

$$\varphi = \frac{\phi}{s}$$

La détermination de φ représente un autre objectif majeur d'une étude consacrée à un processus de transfert thermique. Il représente une mesure de l'intensité du transfert de chaleur qui caractérise en faite la qualité énergétique de ce processus.

I.2 Les trois modes de transfert de chaleur

Les transferts de chaleurs interviennent naturellement entre deux corps dès qu'il y a une différence de températures entre eux. Ce transfert de chaleur se présente sous trois formes :

La **CONDUCTION** ; la **CONVECTION** ; le **RAYONNEMENT**.

Chacun de ses modes est lié à un processus physique bien déterminé. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu correspond à l'énergie cinétique des éléments qui le constitue (molécules ; atomes ; électrons libres), du fait de leurs liberté de mouvement. Ces derniers peuvent échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c-à-d gagner ou perdre de l'énergie.

- Le transfert thermique moléculaire de la chaleur dans un milieu continu qui se fait par contact immédiat de particules de températures différentes s'appelle transfert de chaleur par **conduction**.
- L'échange de chaleur entre un fluide (liquide ou gaz) et la surface d'un corps solide s'appelle échange de chaleur par **Convection**.
- **Rayonnement thermique ou la radiation** est le processus de propagation de la chaleur par l'intermédiaire des ondes électromagnétiques. Cette forme de transfert est conditionnée par la transformation de l'énergie interne de la matière en énergie de rayonnement (photons), sa transmission (même dans le vide) et son absorption par la matière.

I.3 Formulation d'un problème de transfert de chaleur

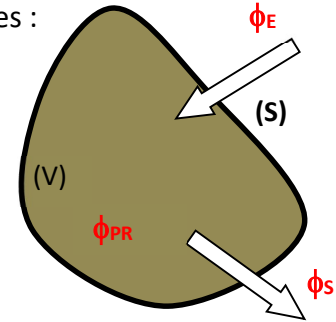
Bilan d'énergie

L'analyse thermique d'un système quelconque a pour objectif, la détermination de l'évolution de la température à l'intérieur du système dans l'espace et le temps $T(x,y,z,t)$.

Il est donc nécessaire d'exprimer la formulation qui conduit à $T(x,y,z,t)$. Cette équation est appelée équation de la chaleur et pour la déterminer, on suit les étapes suivantes :

Etape 1

On définit un volume d'étude (V), limité par une surface (S) à travers laquelle l'énergie et la matière peuvent circuler.



Etape 2

On fait l'inventaire des différents flux de chaleur (ϕ) mis en jeu qui influent sur l'état du système :

- Flux de chaleur entrant ϕ_E
- Flux de chaleur sortant ϕ_S
- Flux de chaleur dissipé (ou produit) dans le volume ϕ_{PR}

Il est à noter que ϕ_{PR} a une autre forme d'énergie : électrique (pertes joules) ; chimique (réaction chimique) ; ...etc. qui est convertie en énergie thermique à l'intérieur du volume.

Etape 3

On fait le bilan d'énergie en appliquant le 1^{er} principe de la thermodynamique (Conservation de l'énergie interne U dans un système isolé sans travail mécanique $W=0$):

Accumulation = Entrée – Sortie + Production
--

Si on suppose que le volume est incompressible et au repos entre deux instants t et t+dt, on écrit :

$$dU = \delta Q = \delta Q_{ext} + \delta Q_{in}$$

$$\frac{dU}{dt} = \phi_E - \phi_S + \phi_{PR}$$

Etape 4

On établit les expressions des différents flux :

a) Flux de chaleur échangé par conduction – loi de Fourier

Cette loi établie expérimentalement par Fourier et donné par :

$$\vec{\phi} = -\lambda \vec{\nabla} T$$

Notant que le signe (-) est dû au sens opposé du gradient de T par rapport au sens de déplacement de la chaleur.

λ est appelé la conductivité thermique [W/m/°K]. Elle dépend bien évidemment de la nature du corps et aussi de sa température.

Exemple de valeur de la conductivité thermique à 20°C [W/m/°K] :

Air statique	Cu	Fe	AP NdFeB	Al	Huiles pour transformateurs
--------------	----	----	-------------	----	-----------------------------

0,025	386	80	8-9	237	0,16
-------	-----	----	-----	-----	------

Pour les matériaux métalliques λ est décroissante avec l'augmentation de T

b) Flux de chaleur échangé par convection - Loi de Newton

Dans le domaine des transferts de chaleur, la loi de Newton, donne le flux de chaleur échangé entre une paroi solide et un fluide en mouvement, elle s'exprime par :

$$\vec{\varphi} = h (T_p - T_{\infty}) \vec{n}$$

h est appelé coefficient d'échange convectif [$\text{W}/\text{m}^2/\text{°K}$]. h dépend de beaucoup de paramètres (propriétés physiques du fluide sa température, la géométrie de la paroi). C'est un paramètre difficile à quantifier d'une manière précise.

c) Flux de chaleur échangé par rayonnement – loi de Stefan-Boltzmann

Le rayonnement est le mode de transfert de chaleur entre deux corps portés à des températures différentes, qui ne nécessite pas de support matériel. Le flux de chaleur, dans ce cas, est donné par la loi de Stefan – Boltzmann.

$$\varphi = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)$$

Avec ε : émissivité du corps $0 < \varepsilon \leq 1$ ($\varepsilon=1$ corps noir). Notant que l'émissivité est sans unité.

σ : constante de **Stefan-Boltzmann** $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2/\text{°K}^4$

Exemples de valeur de l'émissivité de quelques matériaux :

Matériau	Cuivre poli	Cuivre oxydé	Acier oxydé	Peinture Aluminium	Peinture non métallique	Fer laminé	Vernis	Emetteur parfait Corps noir
ε	0.025	0.65- 0.88	0.7 - 0.9	0.45	0.9-0.95	0.77	0.93	1

La formulation de l'équation de la chaleur est élaborée dans le chapitre II.