

**OFPPT**

et Guide de travaux  
S

Module n°-6 : TRANSFERTS THERMIQUES

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail  
DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**RESUME THEORIQUE**

**&**

**GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**Module N°6: TRANSFERTS THERMIQUES**

**SECTEUR : FROID ET GENIE THERMIQUE**

**SPECIALITE : TECHNICIEN SPECIALISE EN THERMIQUE  
INDUSTRIELLE**

**NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE**

**JUIN 2003**



**ISTA.ma**  
**Un portail au service**  
**de la formation professionnelle**

### **Le Portail <http://www.ista.ma>**

Que vous soyez étudiants, stagiaires, professionnels de terrain, formateurs, ou que vous soyez tout simplement intéressé(e) par les questions relatives aux formations professionnelles, aux métiers, <http://www.ista.ma> vous propose un contenu mis à jour en permanence et richement illustré avec un suivi quotidien de l'actualité, et une variété de ressources documentaires, de supports de formation, et de documents en ligne ( supports de cours, mémoires, exposés, rapports de stage ... ) .

Le site propose aussi une multitude de conseils et des renseignements très utiles sur tout ce qui concerne la recherche d'un emploi ou d'un stage : offres d'emploi, offres de stage, comment rédiger sa lettre de motivation, comment faire son CV, comment se préparer à l'entretien d'embauche, etc.

Les forums <http://forum.ista.ma> sont mis à votre disposition, pour faire part de vos expériences, réagir à l'actualité, poser des questionnements, susciter des réponses. N'hésitez pas à interagir avec tout ceci et à apporter votre pierre à l'édifice.

### **Notre Concept**

Le portail <http://www.ista.ma> est basé sur un concept de gratuité intégrale du contenu & un modèle collaboratif qui favorise la culture d'échange et le sens du partage entre les membres de la communauté ista.

### **Notre Mission**

Diffusion du savoir & capitalisation des expériences.

### **Notre Devise**

Partageons notre savoir

### **Notre Ambition**

Devenir la plate-forme leader dans le domaine de la Formation Professionnelle.

### **Notre Défi**

Convaincre de plus en plus de personnes pour rejoindre notre communauté et accepter de partager leur savoir avec les autres membres.

### **Web Project Manager**

- Badr FERRASSI : <http://www.ferrassi.com>

- contactez : [admin@ista.ma](mailto:admin@ista.ma)

## REMERCIEMENTS

**La DRIF remercie les personnes qui ont participé ou permis l'élaboration de ce Module de formation.**

**Pour la supervision :**

**GHRAIRI RACHID :** Chef de projet du Secteur Froid et Génie Thermique

**BOUJNANE MOHAMED :** Coordonnateur de C D C du Secteur Froid et Génie Thermique

**Pour l'élaboration :**

**Madame MARFOUK AZIZA**                      **ISGTF**    **DRGC**

**Pour la validation :**

- **MR : Abdelilah MALLAK**                      : **Formateur à l'ISGTF**
- **MR: Mohamed BARZI**                                : **Formateur à l'STA1 Marrakech**
- **MR :Mustapha BRAHIMI**                            : **Formateur à l' ISTA H. Ennahda Rabat**
- **MR : Samir BELAID**                                 : **Formateur à l'ISTA Kénitra**
- **MR. Lahcen TABATI**                                : **Formateur à l'ISTA Kénitra**
- **MR: Hassan BEZZAZ**                                : **Formateur à l'STA1 Marrakech**

*Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.*

*Monsieur    Said SLAOUI  
DRIF*

<b>Sommaire</b>	<b>page</b>
<i>Présentation du module</i>	
<i>Résumé de théorie</i>	<b>6</b>
I. <i>Chaleur</i>	
I. 1. <i>Généralités et définition</i>	
I. 2. <i>Température</i>	
I. 3. <i>Quantité de chaleur</i>	
I. 4. <i>Transmission de chaleur</i>	
II. <i>Transfert de chaleur par conduction</i>	
II. 1. <i>Phénomène de conduction</i>	
II. 2. <i>Loi de Fourier</i>	
II. 3. <i>Conduction à travers la paroi d'un tube cylindrique</i>	
II. 4. <i>Conduction à travers plusieurs surfaces</i>	
III. <i>Transfert de chaleur par rayonnement</i>	
III. 1. <i>Définitions relatives au rayonnement</i>	
III. 2. <i>Lois du rayonnement</i>	
III. 3. <i>Echange d'énergie par rayonnement entre deux surfaces</i>	
IV. <i>Transfert de chaleur par convection</i>	
IV. 1. <i>Phénomène de convection</i>	
IV. 2. <i>Convection libre : loi de Newton</i>	
V. <i>Echange de chaleur entre deux milieux séparés par une surface</i>	
V. 1. <i>Flux thermique entre deux milieux séparés par une surface plane</i>	
V. 2. <i>Flux thermique entre deux milieux séparés par une surface cylindrique</i>	
VI. <i>Echangeurs de chaleur</i>	
VI. <i>Généralités sur les échangeurs</i>	
VI. 2. <i>Echangeurs par surface</i>	
VI. 3. <i>Calcul des échangeurs</i>	
<i>Guide de travaux dirigés</i>	
TD1 : <i>Conduction à travers un mur hétérogène</i>	
TD2 : <i>Conduction à travers un câble électrique</i>	
TD3 : <i>Calcul de flux de chaleur par rayonnement</i>	
TD4 : <i>Isolation thermique et confort</i>	
TD5 : <i>Refroidisseur à deux étages</i>	
TD6 : <i>Refroidissement du benzène</i>	
<b>Evaluation de fin de module</b>	
<b>Liste bibliographique</b>	

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**COMPORTEMENT ATTENDU**

*Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit calculer le flux de chaleur échangé entre deux milieux selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent*

**CONDITIONS D’EVALUATION**

- A partir de consignes données par le formateur*
- A l’aide de la documentation technique donnée par le formateur*
- A partir de mises en situation*

**CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- Justesse de l’explication des différents modes de transfert de chaleur*
- Exactitude de l’énoncé des lois de transfert de chaleur*
- Calcul exact du flux de chaleur échangé entre deux milieux*

**OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**PRECISION SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

- A- *Expliquer les différents modes d'échanges de chaleur.*
- B- *Calculer le flux de chaleur échangé entre deux milieux.*
- C- *Appliquer les lois de transmission de chaleur au calcul des échangeurs thermiques.*

**CRITERS PARTICULIERS DE  
PERFORMANCE**

- *Identification du mode de transmission de chaleur - entre deux milieux.*
- *Calcul exact du flux de chaleur entre deux milieux séparés par une surface plane.*
- *Calcul exact du flux de chaleur entre deux milieux séparés par une surface cylindrique.*
- *Calcul exact du flux de chaleur échangé à travers un échangeur.*
- *Calcul exact des surfaces d'échange.*

## **OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU**

*LE STAGIAIRE DOIT MAITREISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR ETRE JUGES PREALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :*

**Avant d'apprendre à expliquer les différents modes d'échange de chaleur (A) le stagiaire doit :**

1. définir le concept de température les unités de mesure et les appareils
2. définir le concept de quantité de chaleur et ses unités

**Avant d'apprendre à calculer le flux de chaleur échangé entre deux milieux (B) le stagiaire doit :**

3. calculer le flux de chaleur échangé par conduction
4. calculer le flux de chaleur échangé par rayonnement
5. calculer le flux de chaleur échangé par convection

**Avant d'apprendre à appliquer les lois de transmission de chaleur au calcul des échangeurs © le stagiaire doit :**

6. connaître les différents types d'échangeurs et leur domaine d'utilisation

## **PRESENTATION DU MODULE**

*Le présent module s'inscrit parmi les modules de connaissances scientifiques du technicien spécialisé en thermique industrielle.*

*Il a pour but de fortifier le potentiel d'apprentissage des stagiaires et de faciliter leur insertion dans la culture professionnelle d'appartenance, tout en créant l'intérêt par rapport au métier dès le début de la formation.*

*Il permet aussi aux stagiaires d'acquérir les connaissances fondamentales des modes de transfert thermique et leurs applications industrielles dans un ordre de difficulté croissant*

*Il se déroule selon les étapes suivante :*

- *Notion de chaleur*
- *Transfert de chaleur par conduction*
- *Transfert de chaleur par rayonnement*
- *Transfert de chaleur par convection*
- *Echange de chaleur entre deux milieux séparés par surface*
- *Echangeurs de chaleur*

*Le module est d'une durée de 90h dont :*

- *70% de théorie*
- *30% de travaux pratiques sous forme d'exercices et de travaux dirigés.*

## LA CHALEUR

### INTRODUCTION

La chaleur est une forme d'énergie. Il est difficile de la définir de façon précise mais ses effets sont bien connus : la sensation de chaud ou de froid, la fusion de corps, la transformation d'état chimique, etc....

La chaleur se manifeste selon deux critères :

- un critère « qualitatif » correspondant à la perception sensorielle que l'on peut avoir de la manifestation de cette chaleur : c'est la température ;
- un critère « quantitatif » se traduisant en général par des effets plus ou moins importants de l'action de cette chaleur.

#### 1. Température

La perception de la température par le corps humain est trop imprécise pour permettre d'en donner référence convenable. On a donc été amené à créer des systèmes de repérage précis et constant. Ce sont les échelles thermométriques.

##### 1.1.Echelles de température

La plus utilisée et la plus répandue est l'échelle Celsius. Elle est basée sur deux critères facilement reproductibles et constants :

- La température de l'eau de la glace fondante : on lui a attribué la valeur 0 ;
- La température à laquelle l'eau bout à la pression atmosphérique : On lui a attribué la valeur 100 ;

On a divisé l'intervalle obtenu en degrés et éventuellement en sous-multiples du degré, ce dernier correspondant au centième de l'intervalle défini ci-dessus. Bien entendu on a prolongé les graduations de part et d'autre de la plage de température 0-100.

D'autres échelles sont ou ont été utilisées : l'échelle Fahrenheit en particulier, toujours en usage dans les pays anglo-saxons. On peut facilement passer d'une échelle à l'autre par un calcul simple ou des tables de correspondance.

Les formules de transformation des degrés Celsius en Fahrenheit sont :

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32) \times 5}{9} \quad ; \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{^{\circ}\text{C} \times 9}{5} + 32$$

L'échelle utilisée par les scientifiques est l'échelle Kelvin. Elle part du zéro absolu qui serait le niveau de température atteint si l'on pouvait retirer d'un corps la totalité de l'énergie calorifique qu'il contient. Le zéro absolu correspond à  $-273^{\circ}\text{C}$ . La formule de transformation est donc :

$$T (\text{Kelvin}) = t^{\circ}\text{C} + 273 .$$

---

N B : On retiendra le symbole *T* (majuscule) pour les degrés Kelvin, et *t* (minuscule) pour les degrés Celsius.

## 1.2.Appareils de mesure de température

On mesure les températures avec des thermomètres et des pyromètres. Il en existe des types divers. Nous nous bornerons à décrire très succinctement les plus répandus :

### a) Thermomètre à colonne de liquide :

C'est l'appareil que tout le monde connaît. Il est constitué par un tube de verre de très petit diamètre fermé aux deux extrémités dont l'une renflée constitue une ampoule (bulbe) contenant le liquide. On se sert communément d'alcool teinté en rouge, ou de mercure.

Ces liquides se dilatent sous l'effet de la température ; leur volume augmente en provoquant

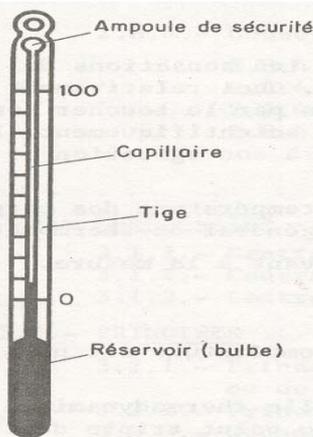


FIGURE 1  
THERMOMÈTRE À MERCURE

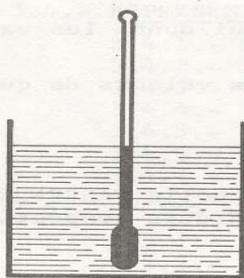


FIGURE 2  
UTILISATION DU  
THERMOMÈTRE À MERCURE

une montée plus ou moins grande dans le tube de verre. Cette montée étant proportionnelle à la température, la colonne qui se forme atteint un niveau maximal qui indique la valeur de température. L'alcool se dilate plus que le mercure. Avec le premier on fait des thermo-mètres peu élevées (au max. 100° environ). Avec le second on peut réaliser des thermomètres montant assez haut (plus de 600°), ce qui n'empêche pas d'en faire aussi pour des températures moyennes.

Les thermomètres à mercure sont plus précis que ceux à alcool. C'est pourquoi ils sont préférés pour des mesures devant présenter quelque rigueur.

### b) thermomètre à dilation pour mesures industrielles :

Ils sont basés sur le principe bien connu qu'un liquide ou un gaz remplissant entièrement une capacité fermée déforme la paroi de celle-ci si elle est élastique, lorsqu'il se dilate sous l'effet de la chaleur. Dans la pratique, un thermomètre de ce type est constitué par un réservoir ou bulbe relié à un élément déformable par l'intermédiaire d'un tube capillaire (à section très faible). Le réservoir et le tube sont très résistants et ne se déforment pas. Seul l'élément sensible qui permet la mesure se déforme. Sa déformation est d'autant plus grande que la température est élevée. Cet élément entraîne un mécanisme approprié portant une aiguille qui se déplace sur un cadran gradué en degrés. Dans ce type d'appareil on utilise soit un liquide soit un gaz, les deux produisant les mêmes effets à partir des mêmes principes avec des éléments constitutifs différents, bien entendu.

### **Quantité de chaleur**

*Pour prendre conscience de la quantité de chaleur il suffit de procéder aux expériences simples ci-après :*

a) *Expérience 1 :*

*On allume un brûleur de fourneau à gaz. Son réglage ne sera pas modifié pendant toute la durée des opérations . On pose sur le brûleur un récipient d'une capacité de deux litres contenant un  $\frac{1}{2}$  l d'eau à la température du robinet ; on mesure le temps qui s'écoule jusqu'à ce l'eau commence à bouillir. Il est de 5 minutes.  
On recommence l'expérience en mettant 1 litre d'eau : le temps est de 10 minutes .  
On met enfin 2 litres : le temps est de 20 minutes.*

*En conclusion, on a constaté que le temps écoulé pour chacune des expériences doublait de l'une à l'autre comme la quantité d'eau. De la même façon la quantité de gaz doublait, elle aussi, puisque le débit instantané du brûleur était constant et que son temps de fonctionnement augmentait. C'est la combustion de ce gaz qui produisait la quantité de chaleur dégagée pendant les expériences .*

*La quantité de chaleur absorbée par l'eau pour arriver à l'ébullition (donc qu'elle avait emmagasinée) était elle aussi doublée à chacune des expériences.*

b) *Expérience 2 :*

*Dans l'expérience précédente, l'opération de chauffage était toujours la même et se déroulait entre deux températures toujours identiques. L'élément variable était la quantité d'eau.*

*La deuxième expérience, toujours à débit de gaz constant, se fait avec une quantité d'eau fixe et*

*on prend en considération la variation de sa température, mesurée par un thermomètre.*

*Au départ l'eau est à 10° , sa température est portée à 30° (20° de plus). Il s'écoule 2 mn ; pour atteindre 50° (40° de plus) il faudra 4 mn ; pour 70° (60° de plus) il faudra 6 mn ; enfin pour 90° (80° de plus), il en faut 8mn.*

*En d'autres termes on constate que le temps de chauffage est proportionnel à l'élévation de la température. Il en est de même pour la quantité de chaleur dégagée par le brûleur, et par voie de conséquence, pour la chaleur emmagasinée par l'eau.*

*Au total ,en superposant le résultat des expériences, on déduit que la quantité de chaleur contenue dans un corps chauffé est proportionnelle à sa masse et à sa température.*

*Cela n'est vrai qu'autant qu'il n'y a pas de changement d'état, c'est à dire que le corps chauffé pendant l'expérience reste solide, ou liquide ou gazeux.*

### **2.1. chaleur spécifique des corps**

*Deux corps différents de même masse n'absorbent pas (et donc ne contiennent pas) la même quantité de chaleur lorsqu'ils sont portés à la même température. Par exemple, il faut beaucoup moins de chaleur pour chauffer 1 kg de fer que pour chauffer 1 kg d'eau ; pour chauffer 1 kg d'air que pour chauffer 1 kg de mazout. Pour évaluer la quantité de chaleur nécessaire au chauffage d'un corps quelconque, il*

faut donc connaître la chaleur d'échauffement qui lui est propre. On désigne cette chaleur par l'expression chaleur spécifique : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° c la température d'une masse de 1 kg du corps considéré.

*Chaleur spécifique de quelques corps  
Kcal/kg/° (et en kj/kg/°)*

métaux			Matériaux divers			liquides		
	Kcal/kg/°	Kj/kg/°		Kcal/kg/°	Kj/kg/°		Kcal/kg/°	Kj/kg/°
Argent	0.057	0.23	Brique	0.3	1.25	Eau	1	4.18
Cuivre	0.095	0.39	graphite	0.2	0.83	Huile de machine	0.40	1.67
Étain	0.055	0.23						
Acier	0.060	0.25				Fioul	0.48	2
Nickel	0.100	0.42				alcool	0.67	2.80
zinc	0.095	0.39				<b>Gaz</b>		
						Air	0.24	1
						Anhydride Carbonique	0.20	0.83
						éthane	0.52	2.17
						méthane		

Pour plus de précision, on emploie l'expression de « chaleur massique » lorsque l'on désigne la chaleur d'échauffement de 1 kg du corps et de « chaleur volumique » celle de l'échauffement d'un m<sup>3</sup> du corps (cas des gaz).

## **2.2. Unités et évaluation des quantités de chaleur**

On exprime les quantités de chaleur en calories (ou en joules). On a défini la calorie comme étant la quantité de chaleur permettant d'élever de 1° C, la température d'un gramme d'eau. Cette unité étant trop petite pour l'usage courant, on la remplace habituellement par le kilo-calorie (kcal) qui est la quantité de chaleur permettant d'élever de 1° c, la température de 1kg d'eau ou la millithermie, de même valeur, sous multiple de la thermie (th) valant elle-même 1 000 kcal.

En conclusion de ce qui précède, on constate que la quantité de chaleur contenue dans un corps, est définie lorsqu'on connaît sa chaleur spécifique, sa masse et sa température.

Pour l'évaluer, dans la plupart des cas, on procède par le calcul en mesurant distinctement la masse et la température, la chaleur spécifique étant supposée connue.

Nous avons déjà vu les appareils permettant de mesurer les températures. Pour la masse on peut soit peser avec une bascule, soit l'évaluer moyennant un compteur, s'il s'agit d'un fluide ou gaz.

**Exemple** : supposons qu'on veut évaluer la quantité de chaleur nécessaire au chauffage d'un fioul contenu dans une cuve de 500l. on veut porter ce fioul initialement à 10°C à la température de 60°C. On sait que sa densité est de 0.9 et que sa chaleur spécifique est de 0.48Kcal /Kg / °C.

L'élévation de température est de :  $60-10 = 50^\circ$

La masse à chauffer est de :  $500 \times 0.9 = 450 \text{ kg}$

Chaleur nécessaire :  $450 \times 0.48 \times 50 = 10800 \text{ kcal}$

$10800 \times 4.18 = 45144 \text{ kJ}$

Il existe aussi des compteurs de chaleur qui donnent directement les quantités recherchées. Ils sont utilisés surtout sur les circuits d'eau chaude ( eau de chauffage ou eau sanitaire).

Ils sont constitués par un compteur de débit de fluide et un thermomètre. Les valeurs des deux sont « lues » par un système intégrateur qui exprime directement la quantité de chaleur passant ou dépensée par le système par une unité de temps déterminée.

### **3- Transmission de chaleur**

Deux corps à températures différentes échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de température on dit alors que l'équilibre thermique est atteint

Cet échange de chaleur (transfert thermique) se fait suivant trois modes de transmission fondamentaux :

#### **3.1. CONDUCTION**

Le phénomène de conduction pure se rencontre essentiellement dans les solides.

Exemple: propagation de la chaleur le long d'une barre de fer dont une extrémité est soumise à l'action d'une flamme.

#### **3.2. RAYONNEMENT**

Tous les corps émettent par leurs surfaces de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques Si cette énergie rayonnée est reçue par un corps absorbant pour ses longueurs d'onde ,elle se transforme en chaleur.

Exemple : le Soleil chauffe la Terre par rayonnement.

#### **3.32- CONVECTION**

Les échanges de chaleur par convection mettent en jeu le déplacement de la matière et se rencontrent essentiellement dans les fluides (gaz-liquides).

Exemple : chauffage de l'air d'une salle par un convecteur (radiateur).

En réalité, tout échange thermique s'effectue simultanément sous les trois modes de transfert qui se concurrencent. L'échange est alors la somme des trois effets. Lorsque l'un des modes est prédominant, on néglige les deux autres.

### Exercices d'application

1) transformer :

- a- en degrés kelvin :      -une température de 37°C  
  -une température de 45°C
- b- en degrés Celsius :    -une température de 51°F  
  -une température de 373K
- c- en degrés Fahrenheit : -une température de 125°C  
  -une température de 210K
- d- en degrés kelvin        - une température de 87°F

2) Transformer :

- a) en KJ                    - 2750 cal  
                                  -1805 th  
                                  -34780 kcal
- b) en kcal                 - 9720J  
                                  -642 th  
                                  -19738 cal

3) calculer en kcal et en kJ la quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer de :

- \* 18°C à 52 °C une masse d'acier de 45 kg
- \* 15°C à 135°C une masse de 2.6 Tonnes de fioul
- \* 8°C à 74°C un volume de 8700 m<sup>3</sup> d'air

4) un réchauffeur d'air tubulaire utilise de l'eau chaude comme fluide de chauffage. Il débite

800 m<sup>3</sup> d'air à l'heure. Cet air est aspiré à une température de 8°C et refoulé à une température de 50°C. La température de l'eau chute de 90°C à 60 °C . 85% de la chaleur est effectivement utilisée pour chauffer l'air.

Calculer le débit horaire d'eau.

## Transmission de chaleur par conduction

### I) Phénomène de conduction :

La conduction thermique est caractérisée par un transfert de chaleur avec support

matériel mais sans déplacement de matière. Ce phénomène s'observe facilement en maintenant dans la main une barre métallique dont on chauffe l'une des extrémités : au moment précis où l'on met la barre dans la flamme, on ne perçoit pas l'effet de la chaleur, après un laps de temps qui varie selon la nature du métal et les dimensions de la barre, on perçoit l'effet de la chaleur.

De l'énergie thermique s'est donc propagée le long de la barre qui a servi de support, sans déplacement du matériau. Il y a eu conduction thermique.

La conduction thermique est donc un processus par lequel la chaleur s'écoule à travers un matériaux, ou entre milieux en contact.

La chaleur s'écoule toujours du milieu à haute température vers le milieu à faible température.

### II) Loi de fournier

#### 1) régime permanent :

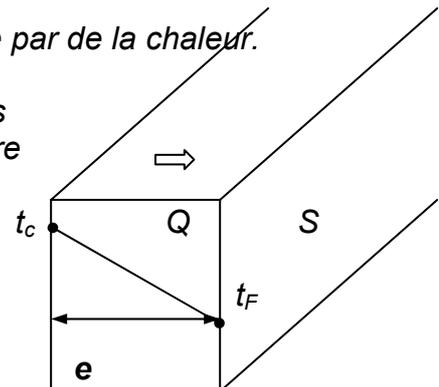
Dans l'étude des trois modes de transmission de chaleur, on considérera que les situations caractérisées par le régime permanent : il s'agit de systèmes pour les quels l'équilibre thermique est atteint : la température en un point de l'espace ou d'un matériau ne dépend pas du temps elle ne dépend que de la position géométrique du point.

#### 2) Loi de Fourier :

Considérons le cas simple d'un mur homogène traversé par de la chaleur.

On suppose que le mur est une masse solide limitée par deux faces planes et parallèles, dont les dimensions sont très grandes par rapport à la distance qui les sépare

Soient  $t_c$   $t_F$  les températures de chacune des faces  
Chaque face est supposée à température constante :  
Ce sont des surfaces iso thermiques.  
 $S$  est l'air des faces et  $e$  l'épaisseur du mur



Supposons que  $t_c > t_F$

l'expérience montre que pour un mur de matériel donné, la quantité de chaleur qui s'écoule de la face chaude vers la face froide pendant un laps de temps donné est proportionnel à l'écart

$(t_c - t_F)$ , proportionnelle à la surface  $S$ , proportionnelle au temps  $\theta$  et inversement proportionnelle à l'épaisseur  $e$  : c'est la loi de Fourier :

$$Q = \lambda (t_C - t_F) \times \frac{S}{e} \theta$$

Le coefficient  $\lambda$  qui caractérise le matériau dont est fait le mur s'appelle : coefficient de conductivité thermique.

$\lambda$  s'exprime en kcal/hm°C ou w/ m°C ou w / m.k

Remarque : kcal/ h = 1.16 w

La loi de Fourier :  $Q = \lambda (t_C - t_F) \times S/e \theta$  s'applique uniquement aux surfaces planes.

3) Flux thermique :

Le rythme avec lequel l'énergie  $Q$  est transmise à travers le mur est désigné par l'expression : flux thermique est représenté par :

$$\Phi = Q/\theta = \lambda (t_C - t_F) \times S/e$$

Cette grandeur a les dimensions d'une puissance et s'exprime en W ou Kcal/h ou KJ/h

4) **Résistance thermique** :

On définit la résistance thermique du mur :  $R$  telle que :

$$\Phi = (t_C - t_F) / R \quad (\text{expression générale})$$

Donc  $R = \frac{1}{\lambda} \times \frac{e}{S}$  (valable uniquement pour les surfaces planes)

La résistance thermique  $R$  désigne la capacité du mur à s'opposer au transfert de chaleur par conduction.

$R$  s'exprime en K/w ou °C/w ou °C X h / Kcal

5) **densité de flux** :

On définit la densité de flux comme étant le flux de chaleur qui traverse l'unité de surface du mur .

$$\phi_s = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{w/m}^2 \text{ ou kcal/h.m}^2)$$

**Exercice d'application 1:**

Calculer la perte de chaleur par conduction à travers un mur de pierre d'épaisseur 0.35m, de hauteur 3.5m et de longueur 5.7m, les températures des faces sont 22°C et 7°C

on donne :  $\lambda_{\text{pierre}} = 0.805 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

**Rép.:**  $\Phi = 690 \text{ kcal/h}$

**III- Conductivité thermique :**

En général, les conductivités thermiques des gaz sont relativement faibles.

Gaz	$\lambda \times 10^2 \text{ W/(m.K)}$				
	-30°C	-10°C	0°C	20°C	50°C
Air	2,2	2,3	2,4	2,55	2,77
Argon	1,49	1,58	1,65	1,72	1,92
Hydrogène	15,5	16,7	17,5	18,1	19,8
Gaz carbonique (CO <sub>2</sub> )	1,23	1,3	1,45	1,55	1,85
Vapeur d'eau			1,6	1,75	1,95
Krypton		0,83	0,85	0,90	5
Néon	4,2	4,45	4,5	4,7	2,75
Azote	2	2,25	2,35	2,55	2,85
Oxygène	2,3	2,4	2,5	2,65	
Fréon 12 (CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	0,7	0,85	0,90	0,93	

Dans le cas des liquides, la mesure de  $\lambda$  est rendue difficile par la présence des effets de la convection.

Liquide	W / (m . K)		
	0°C	20°C	100°C
Eau	0,56	0,6	0,68
Mercure	8,2	8,7	10,5
Huile de graissage	0,147	0,145	0,137
Fréon 12 (CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	0,073	0,073	
Ethylène glycol C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,24	0,25	0,26

Dans le cas des solides ce sont les métaux qui sont les meilleurs conducteurs de chaleur.

**Tableau 3-3 : Conductivité thermique de quelques métaux et alliages**

Métaux	$\lambda$ W / (m . K)	Métaux	$\lambda$ W / (m . K)
Argent pur	420	nickel	90
Cuivre	375	Fer	65
Or	315	Acier (10% de carbone)	40
Aluminium	204	Uranium	27
Tungstène	170	Constantan (60% Cu, 40% Ni)	23
Magnésium	150	Zirconium	21
Zinc	112	Acier inoxydable	16
Laiton (70% Cu, 30% Zn)	110		

**Tableau 3-4 : Conductivité thermique de quelques isolants**

Métaux	W / (m . K)	Métaux	W / (m . K)
Verre	1,2	Plâtre	0,7
Béton	1,75	Bois	0,2
Sol moyen sec	0,14	Polystyrène	0,025
Mica	0,36	Laine de verre	0,035
Caoutchouc	0,16	Neige poudreuse	0,1
Glace (0°C)	2,2	Coton	0,069

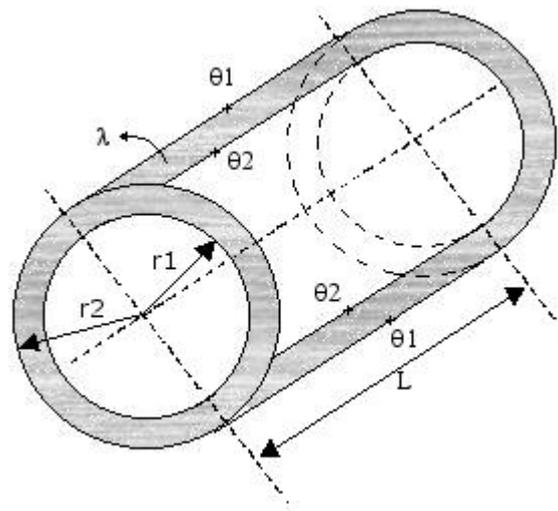
#### IV - Conduction à travers paroi d'un tube cylindrique

$\lambda$  est la conductivité thermique moyenne du matériau constituant le tube.

On suppose :

$$\theta_1 > \theta_2$$

un flux thermique traverse donc le tube de la face interne vers la face externe sur toute la longueur  $l$  du tube



##### 1- Expression du flux :

l'expression du flux est :

$$\phi = \frac{2 \pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \times \lambda \times (\theta_1 - \theta_2)$$

**2) Résistance thermique :**

On définit la résistance thermique du tube  $R_t$  telle que :  $\phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_t}$

$$D'où : R_t = \frac{1}{2 \pi l \lambda} \times \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (k/w \text{ ou } h.k/kcal)$$

**3) Densité du flux thermique :**

La densité du flux est définie par :

$$\rho = \phi / S$$

On définit donc la densité du flux rapportée à la surface interne du tube :

$$\phi_1 = \frac{\phi}{S_1} = \frac{\phi}{2 \pi l r_1} = \frac{\lambda}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \times (\theta_1 - \theta_2)$$

La densité du flux rapportée à la surface externe du tube :

$$\phi_2 = \frac{\phi}{S_2} = \frac{\phi}{2 \pi l r_2} = \frac{\lambda}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \times (\theta_1 - \theta_2)$$

**Exercice d'application 2 :**

Calculer la perte de chaleur par conduction à travers la paroi d'un tube cylindrique en cuivre de (10/12) : - diamètre intérieur = 10 mm

- diamètre extérieur = 12 mm

et de longueur 15 m sachant que température de la paroi interne est 100°C et celle de la paroi externe 99.8°C

$$\lambda_{\text{Cuivre}} = 330 \text{ kcal} / \text{h.m} \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Rép.**  $\phi = 34\,120 \text{ kcal} / \text{h}$

**V- Conduction à travers plusieurs surfaces planes homogènes :**

a) Murs en série :

Considérons plusieurs murs limités par des plans parallèles constitués des matériaux de conductivités différentes, mais en contact parfait

Soient les coefficients de conductivités et les épaisseurs de chaque murs

On suppose qu'il n'y a pas de pertes de chaleur. Donc chaque mur est traversé le même flux

Pour le mur 1

$$\phi = \frac{\lambda_1 S}{e_1} (\theta_c - \theta_1)$$

Pour le mur 2

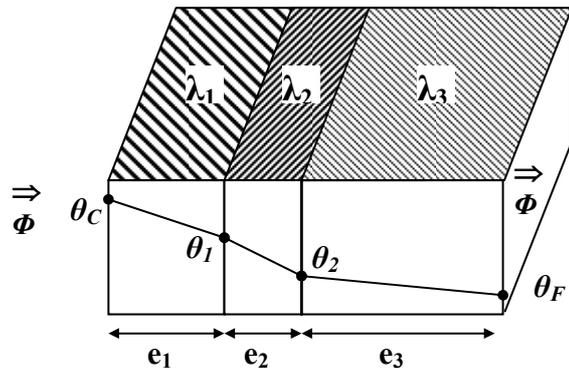
$$\phi = \frac{\lambda_2 S}{e_2} (\theta_1 - \theta_2)$$

Pour le mur 3

$$\phi = \frac{\lambda_3 S}{e_3} (\theta_2 - \theta_F)$$

D'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_c - \theta_1 = \frac{\phi}{S} \frac{e_1}{\lambda_1} \\ \theta_1 - \theta_2 = \frac{\phi}{S} \frac{e_2}{\lambda_2} \\ \theta_2 - \theta_F = \frac{\phi}{S} \frac{e_3}{\lambda_3} \end{array} \right.$$



en additionnant membre à membre, on obtient :  $\theta_c - \theta_F = \frac{\phi}{S} \left[ \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} \right]$

d'où l'expression du flux :

$$\phi = \frac{\theta_c - \theta_F}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} \times S$$

La relation précédente peut s'écrire :

$$\phi = \frac{\theta_c - \theta_F}{\underbrace{\frac{e_1}{\lambda_1 S}}_{R_1} + \underbrace{\frac{e_2}{\lambda_2 S}}_{R_2} + \underbrace{\frac{e_3}{\lambda_3 S}}_{R_3}}$$

Si on pose  $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$  : résistance thermique équivalente ; on retrouve l'expression générale du flux

$$\phi = \frac{\theta_C - \theta_F}{R_{eq}}$$

**Les résistances thermiques des trois murs sont placées en série et leur somme constitue la résistance thermique équivalente des 3 murs accolés :**

b) **murs en parallèle :**

soient  $R_1, R_2, R_3$  les résistances thermiques des 3 i

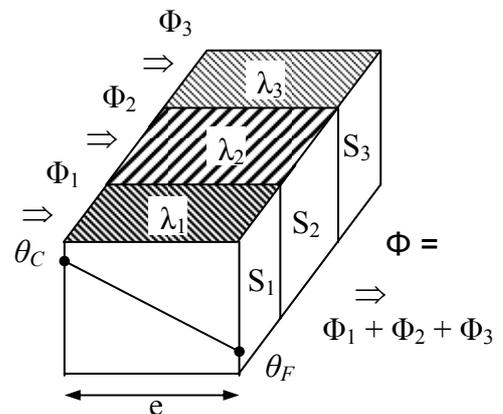
$$\begin{aligned}\phi &= \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \\ &= (\theta_C - \theta_F)(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)\end{aligned}$$

Si on pose :

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

On obtient :

$$\phi = (\theta_C - \theta_F)/R_{eq} \quad (\text{expression générale})$$



$R_{eq}$  constitue donc la résistance équivalente des murs placés en parallèles

c) **Résumé général :**

Si des résistances thermiques sont en série, alors leur résistance équivalente est égale à leur somme

Si des résistances thermiques sont en parallèle, alors l'inverse de résistance équivalente est la somme de leurs inverses (à appliquer à toute surface).

**Exercice d'application 3 :**

Considérons un mur constitué par une couche de béton de 10 cm d'épaisseur, d'un isolant de laine de verre de 5 cm d'épaisseur et d'un revêtement de plâtre de 2 cm d'épaisseur. La surface externe du béton en contact avec l'air intérieur est à 20 °C, la surface externe du béton est à 5 °C.

- 1) calculer le flux thermique passant par m<sup>2</sup> du mur
- 2) calculer les températures à l'intérieur du mur

Réponse :

1)  $R_{\text{plâtre}} = 2,86 \times 10^{-2} \text{ °C.m}^2/\text{w}$

$R_{\text{Laine verre}} = 1,43 \text{ °C.m}^2/\text{w}$

$R_{\text{Béton}} = 5,7 \times 10^{-2} \text{ °C.m}^2/\text{w}$

$\Phi = 9,87 \text{ w/m}^2$

2)  $\theta'_1 = 19,7 \text{ °C}$

$\theta'_2 = 5,6 \text{ °C}$

## TRANSFERT DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

### I-Sensation de rayonnement :

Lorsque la température ambiante n'est pas très élevée on a quand même une impression (sensation) de chaleur si le soleil brille. Si un nuage passe devant le soleil, instantanément on a une impression de froid. Pourtant, la température ambiante est restée la même. Le rayonnement du soleil qui nous réchauffait à été capté par le nuage.

### II- Définitions relatives au rayonnement :

1) Tout corps émet dans toutes les directions des radiations calorifiques (rayonnement).

Tout autre corps placé en regard du premier captera ces radiations et s'échauffera s'il est à une température inférieure à celle du premier. Il y a alors échange de chaleur par rayonnement du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

On dit que le corps le plus chaud est émissif et le corps le plus froid est absorbant.

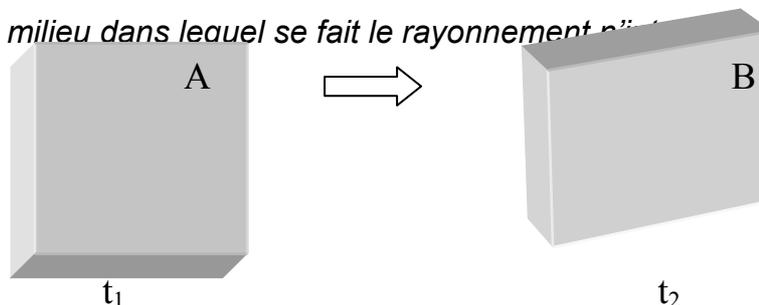
2) Le pouvoir émissif d'un corps est la quantité de chaleur rayonnée par l'unité de surface du corps, dans l'unité de temps, à une température donnée. C'est une grandeur analogue à une densité de flux calorifique.

3) Le pouvoir absorbant d'un corps est le rapport entre la quantité de rayonnement qui frappe le corps et la quantité de rayonnement absorbée. Le corps noir a par définition, un pouvoir absorbant égal à 1 : il est capable d'absorber tous les rayonnements qui les frappent.

4) Le coefficient de rayonnement  $\xi$  (ksi) d'un corps est la quantité d'énergie rayonnée dans toutes les directions par unité de surface du corps, dans l'unité de temps et par degré de température absolue.

### III- Lois du rayonnement :

1) le milieu dans lequel se fait le rayonnement n'est pas comme support.



Le corps B recevra (à une faible distance) une quantité de chaleur sous forme de rayonnement émanant du corps A.

Elle sera peu différente si l'espace compris entre les deux corps était du vide.

2) Tous les corps, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux sont susceptibles de rayonner.

Exemples : \* rayonnement d'un barreau métallique porté à l'incandescence,  
\* rayonnement des gaz de combustion d'un générateur de chaleur,  
\* rayonnement d'une masse de métal en fusion,

3) La transmission de chaleur par rayonnement dépend des conditions d'émission et de réception.

**a) L'émission :**

L'énergie rayonnée dans l'unité de temps est déterminée par la formule :

$$\varphi = S \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Loi de Stephane Boltzman}$$

$\varphi$  : flux de chaleur rayonné

$\varepsilon$  : facteur d'émission (compris entre 0 et 1)

$\sigma$  : constante de Stéphan Boltzman

$$\begin{aligned} \sigma &= 5,657 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4 \\ &= 4,92 \times 10^{-8} \text{ kcal/h.m}^2 \cdot \text{K}^4 \end{aligned}$$

$S$  : surface du corps

$T$  : température absolue du corps (K)

Rque : \*  $\xi = \varepsilon \sigma$

\* corps noir  $\Rightarrow \varepsilon = 1$

**b) La réception :**

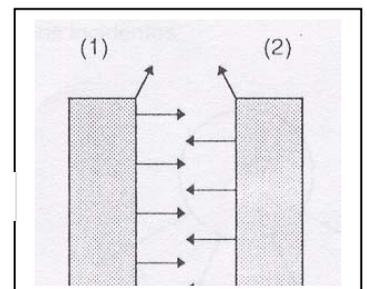
La réception dépend des facteurs suivants :

\* Surface offerte aux radiations : plus la surface est grande, plus l'échange est important.

\* Distance entre le corps émissif et le corps absorbant : l'échange diminue très rapidement avec la distance si l'échange ne s'effectue pas dans le vide.

\* Nature de la surface de réception : une surface noire mate absorbe le maximum de radiations. Si elle est polie elle en absorbe moins (pertes par réflexion).

**Remarque** : les corps que l'on rencontre dans les foyers industriels (chaudières, fours ; ...) sont des corps « gris » dont le facteur d'absorption est compris entre 0.8 et 0.95.



**IV) Echange d'énergie entre deux surfaces :**

**1) Cas de deux surfaces planes parallèles, de même aire , faiblement distancées :**

Le bilan thermique entre les deux surfaces est donné par la relation :

$$\phi = S \varepsilon_{12} \sigma ((T_1)^4 - (T_2)^4)$$

S= l'air de chacune des surfaces.

$$\varepsilon_{12} = ((1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2))^{-1}$$

Si  $t_1 > t_2$  le bilan indique que c'est S(2) qui reçoit de l'énergie.

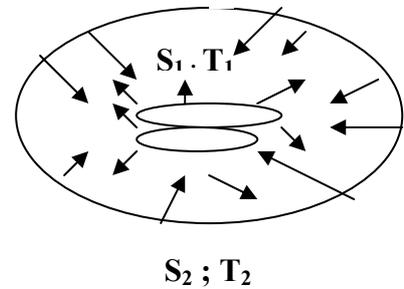
Si  $t_1 < t_2$ , c'est la surface S(1) qui reçoit plus d'énergie qu'elle n'envoie sur S(2)

### 3) Cas d'une surface S1 complètement entourée par une très grande surface S(2)

Tous le rayonnement émis par S<sub>1</sub> est reçu par S<sub>2</sub>.

Le flux échangé dans ce cas, très souvent rencontré (objet dans un four, dans une chambre,...), est donné par la relation suivante :

$$\phi = S_1 \varepsilon_1 \sigma ((T_1)^4 - (T_2)^4)$$



### Exercices d'application

- I) Calculer la quantité d'énergie émise par rayonne par un corps noir de surface 0.9 m<sup>2</sup> s'il est à une température de 700°C puis 1500°C

Rep. : Q1 = 45.6 KW      Q2 = 504 KW

- II) Soient deux plaques de même surface, l'une à  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  et l'autre à  $t_2 = 20^\circ\text{C}$   
 a. calculer le flux maximal échangeable par m<sup>2</sup>.  
 b. Calculer le flux dans le cas où les plaques sont en aluminium poli :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$$

Rep:

a)  $\Phi_{max} = 680 \text{ W}$

b)  $\Phi = 13.6 \text{ W}$

CONTROLE CONTINU:

1) Identifier le mode de transfert thermique qui intervient dans les cas suivants :

- a) chauffage d'un local par un radiateur
- b) échauffement d'une barre métallique par l' action d'une flamme
- c) échauffement de la Terre par le Soleil

2) On chauffe 5 Kg d'eau de 20°C à 100°C à la pression atmosphérique. La chaleur massique spécifique de l'eau est  $C = 1 \text{ Kal / Kg}^\circ\text{C}$   
calculer la quantité de chaleur reçue par l'eau

3) calculer le flux de chaleur émis par un corps de surface  $0.9 \text{ m}^2$  est de facteur d'émission 0.1 sachant que sa température est de 700°C

constant de stéphane Boltzman  $\sigma = 5,657 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2.\text{K}^4$

4) la paroi d'un four est composée de 3 couches juxtaposées :

12 cm de brique réfractaire à l'intérieur, 10 cm de brique ordinaire et 15 cm de brique de magnésie à l'extérieur.

Si la surface intérieure est à 827°C et la surface extérieure est 112°C, quelle est la chaleur perdue par conduction à travers la paroi de surface  $1 \text{ m}^2$ .

On donne :

$$\lambda \text{ Kcal / h. m. }^\circ\text{c}$$

Brique réfractaire :	0.177	
Brique ordinaire :	0.223	
Brique de magnésie :		3.08

**TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION****I) Phénomène de convection**

Les transferts de chaleur par convection se produisent dans les fluides. Ces derniers sont constitués par les liquides et les gaz.

Un fluide est dépourvu de rigidité : il peut subir de grandes déformations sous l'action de forces même très faibles.

Un fluide ne possède pas de forme propre, il prend la forme du récipient qui le contient.

Le passage d'une forme à une autre se fait par écoulement. Cette propriété de pouvoir ainsi s'écouler est la fluidité. Cette qualité est variable suivant le fluide considéré.

Il y'a convection lorsqu'un fluide, parce qu'il ne possède pas une température homogène, se met en mouvement.

C'est le cas de l'air d'un local échauffé par la paroi chaude d'un radiateur : la couche d'air en contact direct avec la paroi chaude se dilate, sa masse volumique diminue, elle devient alors plus légère qu'une autre couche plus froide est passe vers le haut. Une couche d'air plus froide vient la remplacer et le processus continue naturellement. On parle alors de convection libre ou naturelle.

Lorsque le mouvement est favorisé par des moyens extérieurs, comme c'est le cas avec les pompes de circulation les ventilateurs...etc. ; on parle de convection forcée.

**II) Convection libre :**

La transmission de chaleur entre un fluide à la température  $t_f$  et une face solide à la température  $t_p$  se fait par convection.

Le flux thermique échangé est donné par la loi de NEWTON :

$$\Phi = h.S.(t_p - t_f)$$

$S$  : surface d'échange

Le coefficient de proportionnalité  $h$  est le coefficient moyen d'échanges par convection.

Les unités de  $h$  sont : Kcal / h. m<sup>2</sup>. °C ou w / m<sup>2</sup>. °C.

Cette équation signifie que le flux thermique qui passe de la paroi au fluide ou vice versa est proportionnel à l'écart de température entre la paroi et le fluide.

Le coefficient  $h$  dépend de plusieurs facteurs :

- nature du fluide
- vitesse moyenne du fluide
- forme de la surface d'échange.

**Conclusion** : le calcul des coefficients d'échange est très difficile, on fait souvent appel à des formules empiriques.

**III) Convection dans l'air :**

Les échanges dans l'air libre étant des cas fréquents, il existe des formules pratiques pour les mesurer.

Pour l'air, au voisinage de la température ambiante, le coefficient  $h$  est donné par les formules suivantes ( en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  ) :

\*Pour des plaques verticales :

$$h = 1.4 (\theta / d)^{1/4}$$

\*Pour des plaques horizontales:

\_ partie chaude vers le haut :

$$h = 1.14 (\theta / d)^{1/4}$$

\_ partie chaude vers le bas :

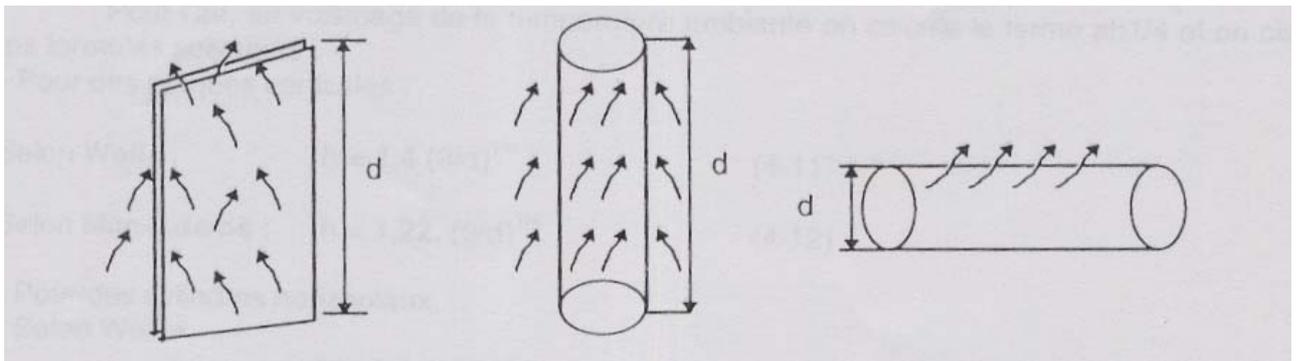
$$h = 0.51 (\theta / d)^{1/4}$$

\*Pour des cylindres:

$$h = 1.3 (\theta / d)^{1/4}$$

Avec:  $\theta$  : différence de température entre la paroi et l'air ;

$d$  : dimension de référence de la paroi en contact avec l'air ,suivant laquelle ont lieu les échanges de chaleur.(voir figure).



### Exercices d'application :

1) Un tube horizontal de 30 cm de diamètre et de 3 cm de longueur est à une température de  $250^\circ C$  dans une salle où température ambiante est  $15^\circ C$ . Calculer le flux thermique échangé par convection libre.

Rép :  $h = 6.9 W/m^2 \cdot ^\circ C$

$$\Phi = 4580W$$

2) Le mur d'une habitation a 26cm de hauteur et 10cm de longueur. Sous l'échauffement du soleil, la température de sa face extérieure atteint  $40^\circ C$ . La température de l'air étant  $20^\circ C$ , calculer la chaleur échangée par le mur avec l'air extérieur en convection libre.

Rép :  $h = 1.9 W/m^2 \cdot ^\circ C$

$$\Phi = 2300W$$

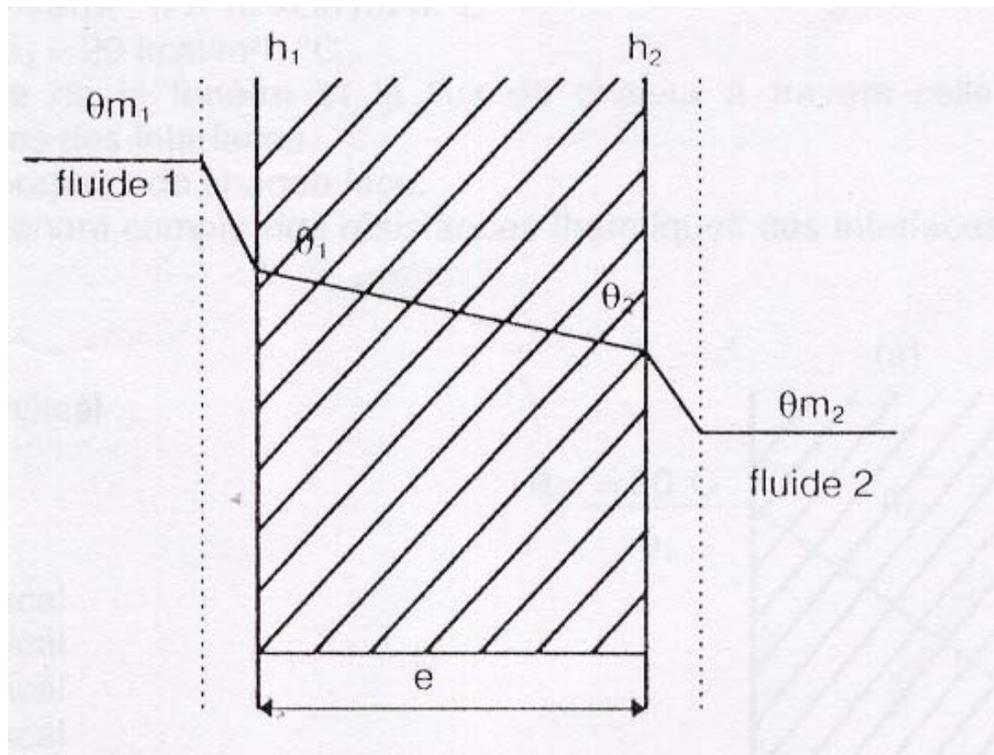
## **ECHANGE DE CHALEUR ENTRE DEUX MILIEUX SEPARÉS PAR UNE SURFACE**

### **1) Flux thermique entre deux fluides séparés par une surface plane**

Soient 2 fluides, l'un à la température  $\theta_{m1}$  et l'autre à la température  $\theta_{m2}$ , séparés par une surface plane.

$S$  est l'aire de la surface .

On suppose que  $\theta_{m1} > \theta_{m2}$  .



### **1) Expression du flux thermique**

Le flux thermique est tel que :

$$\Phi = S.h_1.( \theta_{m1}- \theta_1) = \lambda.S/e.( \theta_1- \theta_2) = S.h_2.( \theta_2- \theta_{m2})$$

Donc :  $\theta_{m1}- \theta_1 = \Phi / S.h_1$

$$\theta_1- \theta_2 = \Phi / \lambda.S/e$$

$$\theta_2- \theta_{m2} = \Phi / S.h_2$$

En additionnant membre à membre, on obtient :

$$\theta_{m1} - \theta_{m2} = \Phi / S.(1/h_1 + e/\lambda + 1/h_2)$$

d'où l'expression du flux thermique  $\Phi = (\theta_{m1} - \theta_{m2}).S/(1/h_1 + e/\lambda + 1/h_2)$

## 2) Coefficient global de transmission K

Le coefficient global de transmission K est défini tel que :

$$\Phi = K.S.(\theta_{m1} - \theta_{m2})$$

Donc :

$$K^{-1} = 1/h_1 + e/\lambda + 1/h_2$$

Si on pose:

$$R_1 = 1/h_1 S$$

Résistance thermique

Résistance thermique

du fluide 1

fluide 2

$$R_m = e/\lambda . S$$

Résistance thermique

de la surface

$$R_2 = 1/h_2 S$$

du

La Résistance thermique équivalente est alors :

$$R_{eq} = R_1 + R_m + R_2$$

### **Exercice d' application :**

Une chambre dont la température est 20°C communique avec l'extérieur où règne une température de -10°C par une fenêtre en verre de 2 m<sup>2</sup> de surface et 4 mm d'épaisseur.

$$\lambda_{\text{verre}} = 0.6 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{air int - verre}} = 10 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{}^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{air ext - verre}} = 20 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{}^\circ\text{C}$$

a) Calculer la résistance thermique de la fenêtre et le flux de chaleur à travers celle ci en négligeant les résistances thermiques des interfaces.

En déduire la température de chaque face de la fenêtre .

b) Même question en tenant compte des résistances thermiques des interfaces.

Rep : a)  $R_F = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C.h/Kcal}$

$$\Phi = 9.1 \cdot 10^3 \text{ Kcal / h}$$

$$\theta_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = -10^\circ\text{C}$$

b)  $R_1 = 0.05 \text{ }^\circ\text{C.h/Kc}$  ;  $R_2 = 0.025 \text{ }^\circ\text{C.h/Kcal}$  ;  $R_{eq} = 0.078 \text{ }^\circ\text{C.h/Kcal}$

$$\Phi = 385 \text{ Kcal / h}$$

$$\theta_1 = 0.75^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = -0.5^\circ\text{C}$$

## II- Flux thermique entre deux fluides séparés par une surface cylindrique circulaire

Le tube contient un fluide dont la température de mélange est  $\theta_{m1}$ , à l'extérieur la température est  $\theta_{m2}$ , les coefficients de convection sont  $h_i$  et  $h_e$ .

On suppose que  $\theta_{m1} > \theta_{m2}$

On se propose de calculer le flux thermique à travers le tube sur une longueur L.

Les deux interfaces et le tube constituent 3 résistances thermiques qui sont placées en série.

- Résistance interne

$$R_i = 1/h_i S_i = 1/h_i \times (1/2\pi L r_i)$$

- Résistance du tube cylindrique

$$R_t = \ln(r_2/r_1)/(2\pi L \lambda)$$

- Résistance externe =  $R_e = 1/h_e S_e = 1/h_e \times 1/2\pi r_e L$

La résistance équivalente sera :

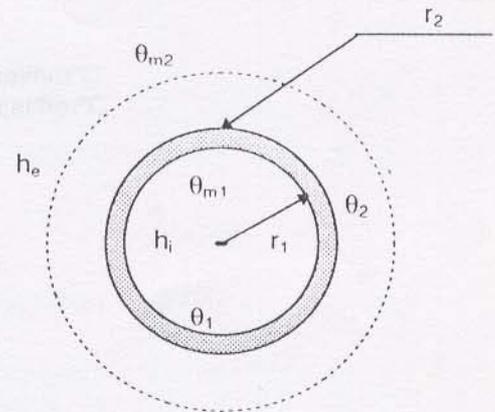
$$R_{eq} = R_i + R_t + R_e$$

$$R_{eq} = 1/2\pi L (1/h_i r_i + \ln(r_e/r_i)/\lambda + 1/h_e r_e)$$

d'où le flux thermique :

$$\Phi = (\theta_{m1} - \theta_{m2})/R_{eq}$$

$$\Phi = 2\pi L / [1/h_i r_i + \ln(r_e/r_i)/\lambda + 1/h_e r_e] \cdot (\theta_{m1} - \theta_{m2})$$



### a) coefficient global de transmission :

Sa valeur dépend de la surface à laquelle on le rapporte soit à la surface interne  $S_i$ , la surface externe  $S_e$ , et on a la surface moyenne du tube  $S_m$ .

On a alors les égalités suivantes :

$$\Phi = K_i S_i (\theta_{m1} - \theta_{m2}) = K_e S_e (\theta_{m1} - \theta_{m2}) = K_m S_m (\theta_{m1} - \theta_{m2})$$

$$K_i S_i = K_e S_e = K_m S_m = 2\pi L / [1/h_i r_i + \ln(r_e/r_i) + 1/(h_e r_e)]$$

or, si  $S_i = 2\pi L r_i$

$$S_e = 2\pi L r_e \quad \text{avec } r_m = (r_i + r_e) / 2$$

$$S_m = 2\pi L r_m$$

On aura :  $1/k_i = 1/h_i + r_i \ln(r_e/r_i)/\lambda + r_i/(h_e r_e)$

$$1/k_e = 1/h_e + r_e \ln(r_e/r_i)/\lambda + r_e/h_i r_i$$

$$1/k_m = r_m/(r_i h_i) + r_m \ln(r_e/r_i)/\lambda + r_m/h_e r_e$$

**b) Application**

De la vapeur d'eau saturée à 100°C circule dans un tube en acier 18/21 exposé à l'air ambiant de température 20°C.

$\lambda$  acier = 40 kcal /hm°C

- coefficient de transmission eau - paroi interne  $h_i = 5000$  kcal/hm°C

- coefficient de transmission air - paroi externe  $h_e = 10$  kcal/hm°C

Calculer pour une longueur  $L = 1$  m

- 1- La résistance globale équivalente
- 2- le flux thermique à travers le tube
- 3- les températures des 2 faces du tube.
- 4- les coefficient global rapport à la surface interne.

**Réponse**

- |                      |   |                      |             |
|----------------------|---|----------------------|-------------|
| 1- $R_{\text{tube}}$ | = | $6,1 \times 10^{-4}$ | °Ch/kcal    |
| $R_{i_1}$            | = | $3,5 \times 10^{-3}$ | °Ch/kcal    |
| $R_{\text{eq}}$      | = | 1,509                | °Ch/kcal    |
| 2- $\Phi$            | = | 53,5                 | kcal /h     |
| 3- $\theta_i$        | = | 9,81                 | °C          |
| $\theta_e$           | = | 99,78                | °C          |
| 4- $K_i$             | = | 12                   | kcal /hm°C. |

## **ECHANGEURS DE CHALEUR**

### **I – Généralités :**

Nous pouvons distinguer 2 sortes d'échangeurs :

#### **A – les échangeurs par mélange :**

##### **1°- Principe :**

Deux fluides , à des températures différentes , se mélangent .L'échange peut se faire sans changement d'état ( c'est le cas de la désurchauffe de la vapeur par de la vapeur la saturée ) ou avec changement d'état ( c'est le cas de la désurchauffe de la vapeur par de l'eau).

##### **2°- Avantage :**

L'efficacité d'un tel échangeur est maximale . Toute la Chaleur du fluide chaud est utilisée pour chauffer le fluide froid .

##### **3°- Inconvénients :**

Les applications d'un tel échangeur sont assez limitées pour les raisons suivantes :

- les deux fluides doivent être de même nature ,
- les deux fluides doivent être à des pressions voisines,
- après chaque réchauffage, la totalité du fluide doit être reprise par des pompes .

##### **4°- Application :**

- désurchauffe de la vapeur,
- refroidissement d'un réservoir de détente des purges,
- réchauffage de l'eau dans une dansla bâche d'un dégazeur.

#### **B – les échangeurs par surface :**

##### **1°- Principe :**

Les deux fluides ne sont pas en contact direct : un des fluides est en général canalisé dans un faisceau de tubes , l'autre circule autour de ces tubes .

##### **2°- Avantage :**

La nature des fluides n'importe plus .Ils peuvent être de nature très différente (huile et eau) .Ils peuvent être aussi à des pressions très différentes .

### 3°- Inconvénients :

- Il existe nécessairement un écart de températures entre le fluide réchauffé et le fluide refroidi. L'utilisation de la chaleur lors de l'échange n'est plus totale. Cet écart peut être réduit en augmentant les dimensions de l'échangeur, ce qui ne va pas sans augmenter son prix. Il existe une dimension optimale de l'échangeur conduisant à un écart de température acceptable pour un prix de revient raisonnable.

- L'utilisation d'un échangeur par surface entraîne une perte de charge, dans le circuit des deux fluides, préjudiciable au rendement de l'installation.

### 4°- Application :

- Condenseur
- Réchauffeurs d'eau
- Réfrigérants (huile, eau, ...)
- Générateur de vapeur : chambre de combustion, surchauffeur, économiseur, réchauffeur d'air.

## II – Les échangeurs par surface :

### 1°- Généralités :

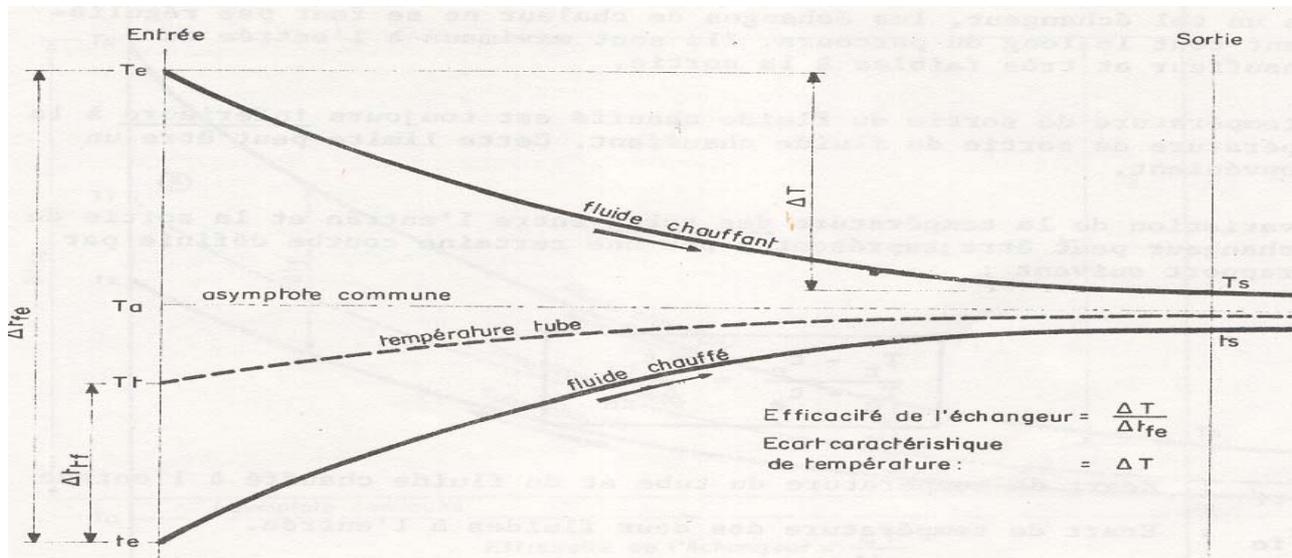
En considérant le sens de parcours du fluide chauffant, par rapport au sens de parcours du fluide chauffé, nous pouvons classer les échangeurs par surface en deux grandes catégories :

#### a) Ceux pour lesquels les sens de parcours sont parallèles :

Deux cas sont alors à considérer:

- Les deux fluides circulent dans le même sens, c'est la circulation antiméthodique.
- Les deux fluides circulent en sens opposé, c'est la circulation méthodique.

#### b) Ceux pour lesquels les sens de parcours sont croisés :

**2°- Echangeurs à circulation antiméthodique (co-courant):**

Dans un tel échangeur les 2 fluides circulent dans le même sens. A l'entrée de l'échangeur, le fluide chauffant le plus chaud (température  $T_e$ ) est mis en contact, par l'intermédiaire du faisceau tubulaire, avec le fluide à réchauffer le plus froid (température  $t_e$ ).

L'écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid est d'abord maximal. L'échange de chaleur sera donc maximal à l'entrée de l'échangeur.

Cet écart diminue progressivement au fur et à mesure que les fluides avancent dans l'échangeur. Il en sera de même des échanges de chaleur.

Si la surface d'échange de l'échangeur était illimitée l'écart des températures finirait par s'annuler. On obtiendrait une température de réchauffage égale à celle que l'on pourrait obtenir dans un réchauffeur par mélange. Cette température est égale à  $T_a$ . On peut dire que les deux fluides tendent vers cette température sans jamais l'atteindre. On dit que la droite d'ordonnée  $T_a$  est une asymptote commune aux deux courbes de variation de température.

**CONCLUSION :**

1°) Dans un tel échangeur, les échanges de chaleur ne se font pas régulièrement tout le long du parcours. Ils sont maximaux à l'entrée du réchauffeur et très faibles à la sortie.

2°) La température de sortie du fluide chauffé est toujours inférieure à la température de sortie du fluide chauffant. Cette limite peut être un inconvénient.

3°) la variation de la température des tubes entre l'entrée et la sortie de l'échangeur peut être représentée par un certaine courbe définie par le rapport suivant :

$$\frac{T_t - t_e}{T_e - t_e} = \frac{\Delta t_{tf}}{\Delta t_{fe}}$$

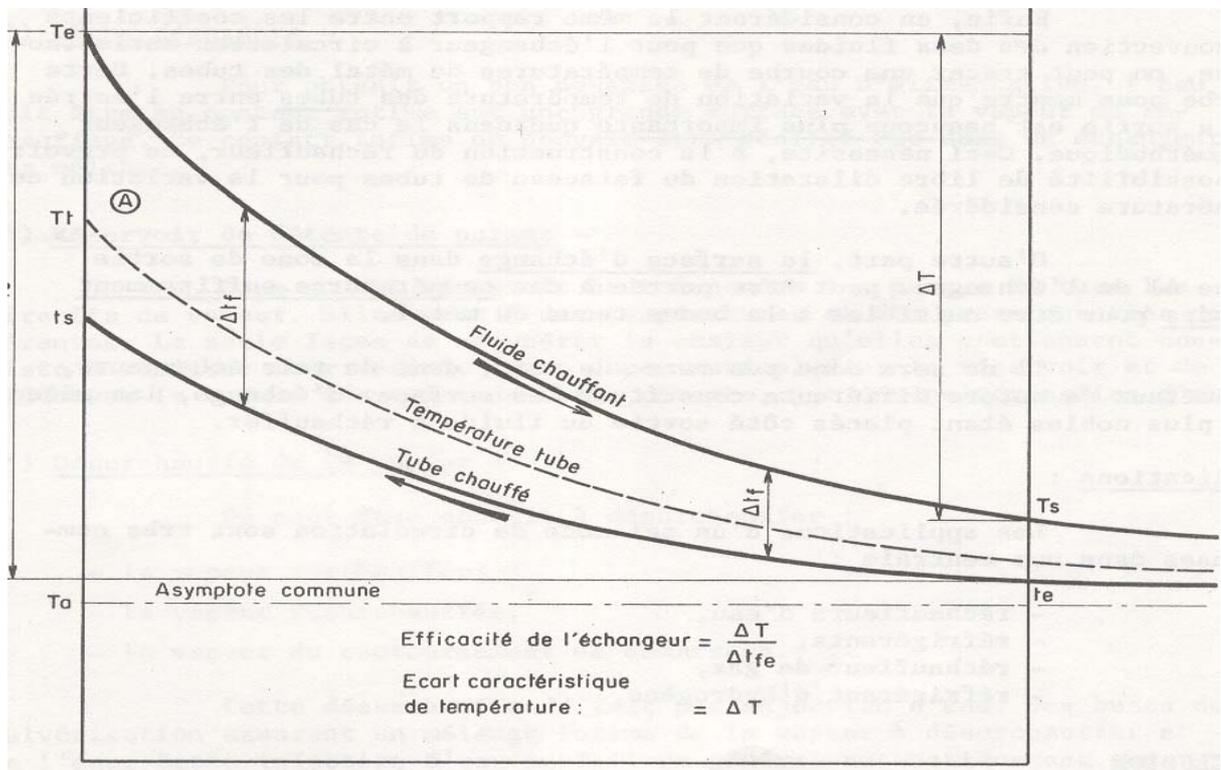
$\Delta t_{tf}$  : Ecart de température du tube et du fluide chauffé à l'entrée

$\Delta t_{fe}$  : Ecart de température des deux fluides à l'entrée.

Ce rapport dépend du rapport des coefficients de convection des fluides chauffant et chauffé. Il reste constant tout le long du parcours.

Ce mode d'échange offre donc l'avantage de limiter la température des tubes situés dans la partie la plus chaude du fluide chauffant à une valeur acceptable pour leur tenue. C'est la raison pour laquelle on l'utilise dans les parties les plus exposées des surchauffeurs secondaires.

### 3°- Echangeurs à circulation méthodique (contre-courant) :



Dans un tel échangeur les parcours se font toujours parallèlement mais dans des sens opposés.

Autrement dit, lorsque le fluide à réchauffer pénètre dans le réchauffeur, il est d'abord en contact, par l'intermédiaire du faisceau tubulaire, avec le fluide de chauffage le plus froid.

On constate que, dans un tel échangeur, l'écart de température  $\Delta t_f$  entre le fluide chauffant et le fluide chauffé reste sensiblement constant dans tout l'échangeur.

La constance de cet écart conduit à une amélioration du rendement du réchauffeur.

D'autre part, on voit qu'avec un tel échangeur, on peut obtenir une température de sortie  $t_s$  du fluide à réchauffer supérieure à la température de sortie  $T_s$  du fluide chauffant ( $t_s > T_s$ ).

Enfin, en considérant le même rapport entre les coefficients de convection des deux fluides que pour l'échangeur à circulation antiméthodique, on peut tracer une courbe de température du métal des tubes. Cette courbe nous montre que la variation de

température des tubes entre l'entrée et la sortie est beaucoup plus importante que dans le cas de l'échangeur antiméthodique. Ceci nécessite, à la construction du réchauffeur, de prévoir la possibilité de libre dilatation du faisceau de tubes pour la variation de température considérée.

D'autre part, la surface d'échange dans la zone de sortie (zone A) de l'échangeur peut être portée à des températures suffisamment élevées pour être nuisibles à la bonne tenue du métal.

Il ne sera donc pas rare de voir, dans de tels échangeurs, des métaux de nature différente constituer les surfaces d'échange, les métaux les plus nobles étant placés côté sortie du fluide à réchauffer.

### **Applications :**

Les applications d'un tel mode de circulation sont très nombreuses dans une centrale :

- réchauffeurs d'eau,
- réfrigérants,
- réchauffeur de gaz,
- réfrigérant d'hydrogène, ...

### **CONCLUSION :**

La circulation par courants opposés (circulation méthodique) est toujours la plus avantageuse du point de vue rendement de l'échangeur.

Par contre, elle peut conduire à porter localement la paroi, à la sortie de l'échangeur, à une température élevée. Cette considération peut, dans certains cas, la faire rejeter (cas des surchauffeurs de générateur de vapeur).

### **4°- Les échangeurs à circulation croisée :**

Les résultats de la circulation croisée peuvent être comparés à un facteur correctif près (dont la valeur est fournie par des courbes) à ceux de la circulation à courants opposés (méthodique).

Le cas type d'échangeur à circulation croisée nous est fourni par le condenseur. On rencontre également ce mode de circulation dans certains échangeurs de générateurs de vapeur.

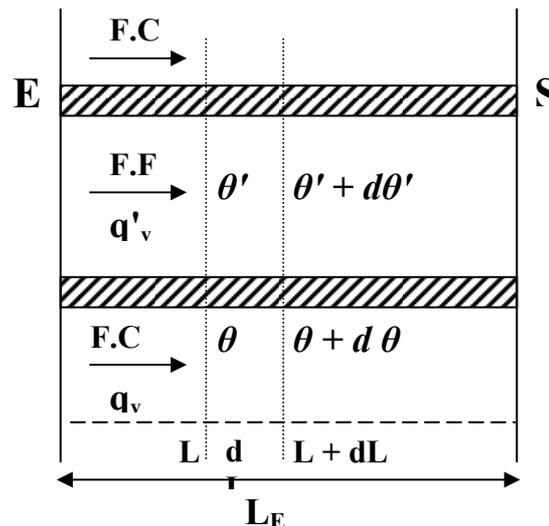
**CALCUL DES ECHANGEURS****I – Expression du flux :**

Toutes les grandeurs physiques liés aux fluides et dépendant de la température sont déterminées pour chaque fluide à la température moyenne de celui-ci (moyenne arithmétique entre la température d'entrée et celle de sortie).

Le coefficient de transmission global est pris constant tout le long de l'échangeur.

**1) Fonctionnement à co-courant :**

Soit un échangeur de longueur  $L_e$ . Faisons le bilan thermique dans une partie élémentaire de l'échangeur de longueur  $dL$  située à la côte  $L$  de l'entrée.



Le bilan thermique consiste à écrire que le flux de chaleur perdu par le fluide chaud lors de son passage entre les plans aux températures  $\theta$  et  $\theta + d\theta$  est intégralement passé à travers la paroi de séparation dans deux fluides, soit :

$$(-)q_v \times \rho \times c \times d\theta = U \times dS \times (\theta - \theta') \quad (1)$$

avec :  $q_v$  : débit volumique du fluide chaud

$\rho$  : masse volumique du fluide chaud

$c$  : chaleur massique du fluide chaud

$U$  : coefficient de transmission global de l'échangeur

**Remarque :** Le signe (-) : pour tenir compte du fait qu'algébriquement  $d\theta$  est négatif.

L'équation (1)  $\Rightarrow$

$$\frac{d\theta}{\theta - \theta'} = - \frac{U \, dS}{\underbrace{q_v \times \rho \times c}_{q_c}} = - U \frac{dS}{q_c}$$

La température  $\theta'$  du fluide froid est liée à la température du fluide chaud par la relation :

$$Q_{re\acute{c}ue} = Q_{c\acute{e}d\acute{e}e}$$

A la c\^ote L, cette relation s'écrit :

$$q_c (\theta_e - \theta) = q'_c (\theta' - \theta'_E) \quad \text{avec} \quad q'_E = q'_v \times \rho' \times c'$$

$$\text{d'o\^u} \quad \theta' = \frac{q_c}{q'_c} \times (\theta_E - \theta) + \theta'_E$$

on peut alors \acute{e}crire, en int\acute{e}grant pour l'\acute{e}changeur de surface totale d'\acute{e}change S :

$$\begin{aligned} - \int_0^S \frac{U \cdot dS}{q_c} &= \int_{\theta_E}^{\theta_S} \frac{d\theta}{\theta - \frac{q_c}{q'_c} (\theta_E - \theta) - \theta'_E} \\ &= \int_{\theta_E}^{\theta_S} \frac{d\theta}{(1 + \frac{q_c}{q'_c})\theta - (\frac{q_c}{q'_c} \theta_E + \theta'_E)} \end{aligned}$$

Soit alors :

$$- \frac{U \times S}{q_c} = \frac{1}{1 + \frac{q_c}{q'_c}} \ln \left[ (1 + \frac{q_c}{q'_c})\theta - (\frac{q_c}{q'_c} \theta_E + \theta'_E) \right]_{\theta_E}^{\theta_S} \quad (2)$$

Or le bilan thermique global entre l'entr\ee et la sortie de l'\acute{e}changeur donne :

$$q_c (\theta_E - \theta_S) = q'_c (\theta'_S - \theta'_E)$$

L'\acute{e}quation (2) devient :

$$- \frac{U \times S}{q_c} = \frac{1}{1 + \frac{q_c}{q'_c}} \ln \frac{\theta_S - \theta'_S}{\theta_E - \theta'_E}$$

de m\^eme :

$$\frac{1}{1 + \frac{q_c}{q'_c}} = \frac{1}{1 + \frac{\theta'_S - \theta'_E}{\theta_E - \theta_S}} = \frac{\theta_E - \theta_S}{(\theta_E - \theta_S) + (\theta'_S - \theta'_E)}$$

d'o\^u la relation :

$$- \frac{U \times S}{q_c} = \frac{\theta_E - \theta_S}{(\theta_E - \theta'_E) - (\theta_S - \theta'_S)} \times \ln \frac{\theta_S - \theta'_S}{\theta_E - \theta'_E} \quad (3)$$

\*  $\theta_E - \theta'_E$  : repr\esente l'\acute{e}cart de temp\erature entre le fluide chaud et le fluide froid \`a l'entr\ee de l'\acute{e}changeur, on le note  $\Delta\theta_E$

\* De m\^eme :  $\theta_S - \theta'_S$  repr\esente l'\acute{e}cart de temp\erature entre le fluide chaud et le fluide froid \`a la sortie de l'\acute{e}changeur, on le note  $= \Delta\theta_S$

La relation (3) s'écrit alors :

$$q_c \times (\theta_E - \theta_S) = U \times S \frac{\Delta \theta_S - \Delta \theta_E}{\ln \frac{\Delta \theta_S}{\Delta \theta_E}}$$

Le terme  $q_c \times (\theta_E - \theta_S)$  représente le flux de chaleur cédé par le fluide chaud lors de son passage dans l'échangeur.

Le rapport  $\frac{\Delta \theta_S - \Delta \theta_E}{\ln \frac{\Delta \theta_S}{\Delta \theta_E}}$  est la moyenne logarithmique  $\Delta \theta_m$  de la fonction  $\Delta \theta = \theta$

–  $\theta'$

Le flux de chaleur échangé se met alors sous la forme :

$$\phi = U \times S \times \Delta \theta_m$$

Avec :

$$\Delta \theta_m = \frac{\Delta \theta_S - \Delta \theta_E}{\ln (\Delta \theta_S / \Delta \theta_E)}$$

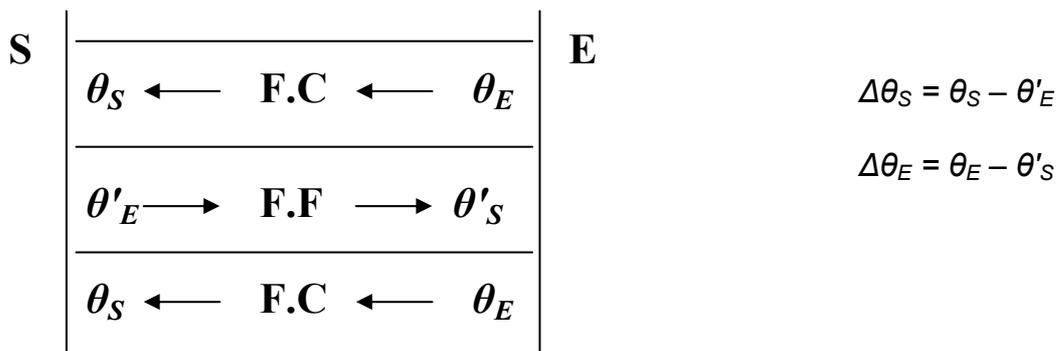
## 2) Fonctionnement à contre-courant :

Un calcul analogue à celui effectué pour le co-courant conduit à une expression du flux de chaleur de la même

$$\phi = U \times S \times \Delta \theta_m$$

$\Delta \theta_S$  et  $\Delta \theta_E$  ont la même signification.

**Mais, attention :**



(l'entrée de l'échangeur est par convention réservée au côté par où entre le fluide chaud)

### 3) Comparaison entre les deux modes de fonctionnement :

**Exemple :**  $\theta_E = 300\text{ °C}$        $\theta_S = 200\text{ °C}$   
 $\theta'_E = 20\text{ °C}$        $\theta'_S = 100\text{ °C}$

\*Contre-courant :

$$\Delta\theta_m = \frac{(200 - 20) - (300 - 100)}{\ln \frac{200 - 20}{300 - 100}} = 189,8\text{ °C}$$

\*Co-courant :

$$\Delta\theta_m = \frac{(200 - 100) - (300 - 20)}{\ln \frac{200 - 100}{300 - 20}} = 174,8\text{ °C}$$

Pour un échangeur double tube donné, le flux de chaleur transféré est plus important dans le cas du fonctionnement à contre-courant, par suite à la valeur élevée de  $\Delta\theta_m$ .

Chaque fois que les deux modes de fonctionnement sont possibles, ce qui n'est pas toujours le cas on préférera naturellement le contre courant.

Mais dans la pratique, certaines conditions d'exploitation peuvent imposer un fonctionnement à co-courant (pour éviter par exemple des dépôts par solidification, ...).

#### Exercices d'application1 :

I) De l'acide sulfurique circule avec une vitesse de 0,8 m/s dans l'espace annulaire d'un échangeur tubulaire constitué de deux tubes de diamètres 18/21 et 50/60.

Sachant que la température de l'acide passe de 85 °C à 21 °C, déterminer le flux de chaleur cédé à l'eau de refroidissement .

Données : Acide sulfurique :  $\rho = 1840\text{ kg/m}^3$   
 $c = 0,36\text{ kcal/kg.°C}$

**Rép :**  $\Phi = 1,9 \times 10^5\text{ kcal/h}$

II) Déterminer la surface d'échange nécessaire pour refroidir en continu 30.000 kg/h d'une solution de 66 °C à 39 °C en utilisant 29.500 kg/h d'eau de refroidissement à 12 °C, et ce dans le cas d'un fonctionnement à co-courant puis à contre-courant.

Données :  $C_{\text{solution}} = 0,9\text{ kcal/kg.°C}$        $C_{\text{eau}} = 1\text{ kcal/kg.°C}$   
 Coefficient global de transmission :  $U = 2100\text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$

**Rép :**

Co-courant :  $S = 21,2\text{ m}^2$   
 Contre-courant :  $S = 12,34\text{ m}^2$

**II – Efficacité d'un échangeur :****1) Fonctionnement à contre-courant :**

On définit l'efficacité d'un échangeur fonctionnant à contre-courant comme étant le rapport entre le flux de chaleur effectivement transféré à travers l'échangeur et le flux maximal transférable dans le cas d'une surface d'échange infinie.

On définit :

- Une efficacité de chauffage si le but est de chauffer le fluide froid.
- Une efficacité de refroidissement si le but est de refroidir le fluide chaud.

**\*Efficacité de refroidissement :**

Si la surface d'échange était infinie, on aurait :  $\theta_S = \theta'_E$

d'où le flux maximal transférable est :

$$\Phi_{max} = q_c \cdot (\theta_E - \theta'_E)$$

et le flux effectivement transféré :

$$\Phi = q_c \cdot (\theta_E - \theta_S) \text{ d'où d'où}$$

d'où :

$$\eta_r = \frac{\theta_E - \theta_S}{\theta_E - \theta'_E}$$

**\*Efficacité de chauffage :**

Si la surface d'échange était infinie, on aurait :  $\theta'_S = \theta_E$

d'où le flux maximal transférable est ::

$$\Phi_{max} = q'_c \cdot (\theta_E - \theta'_E)$$

et le flux effectivement transféré

$$\Phi = q'_c \cdot (\theta'_S - \theta'_E)$$

$$\eta_c = \frac{\theta'_S - \theta'_E}{\theta_E - \theta'_E}$$

**2) Fonctionnement à co-courant :**

L'efficacité est toujours définie comme le rapport entre le flux de chaleur effectivement échangé et le flux maximal échangeable dans les conditions d'une surface d'échange infinie.

Dans ce dernier cas, les deux fluides sortiront à la même température  $\theta_{lim}$ .

d'où :  $q_c \cdot (\theta_E - \theta_{lim}) = q'_c \cdot (\theta_{lim} - \theta'_E)$

or,  $(\theta_E - \theta'_E) = (\theta_E - \theta_{lim}) + (\theta_{lim} - \theta'_E)$

d'où :

$$\theta_{lim} = \theta_E - \frac{1}{1 + Z} (\theta_E - \theta'_E) \quad \text{avec} \quad Z = \frac{q_c}{q'_c}$$

$$\text{donc } \eta_r = \frac{\theta_E - \theta_S}{\theta_E - \theta_{lim}} \quad \text{et} \quad \eta_c = \frac{\theta'_S - \theta'_E}{\theta_{lim} - \theta'_E}$$

***Module : TRANSFERT THERMIQUE***

***GUIDE DES TRAVAUX DERIGES***

**I)TD1 : CONDUCTION A TRAVERS UN MUR HETEROGENE****1.1: Objectif (s) visé (s) :**

- Appliquer la loi des résistances thermiques en série pour le calcul du flux de chaleur

**1.2. Durée du TP : 45 mn****ENONCE DU TD**

le mur d'une maison est constitué d'une couche de brique de 22cm est d'une autre couche de brique de 11 cm , les deux couches sont reliées entre elles par une épaisseur de mortier de 1 cm. Le mur est recouvert sur la face interne d'une couche de plâtre de 1 cm et porte sur sa face externe un crépi de 1,5 cm .En prenant comme conductivités thermiques :

$$\lambda 1 = 0,4 \text{ kcal / h.m.}^\circ\text{C pour le plâtre}$$

$$\lambda 2 = 0,45 \text{ kcal / h.m.}^\circ\text{C pour le brique}$$

$$\lambda 3 = 0,7 \text{ kcal / h.m.}^\circ\text{C pour le mortier}$$

$$\lambda 4 = 0,5 \text{ kcal / h.m.}^\circ\text{C pour le crépi}$$

**Calculer pour une surface de 125 m<sup>2</sup> :**

a-la résistance thermique de chaque couche (5 couches)

b-la résistance thermique équivalente

c-le flux thermique pour une différence de température entre la face interne et la face externe du mur de 5°C-

Rép : a)  $R_{\text{plâtre}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ h }^\circ\text{C / kcal}$

$$R_{\text{brique 1}} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ h.}^\circ\text{C / kcal}$$

$$R_{\text{brique 2}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ h.}^\circ\text{C / kcal}$$

$$R_{\text{mortier}} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ h.}^\circ\text{C / kcal}$$

$$R_{\text{crépi}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ h.}^\circ\text{C / kcal}$$

b)  $R_{\text{eq}} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ h.}^\circ\text{C / kcal} - \text{ C } ) \Phi = 794 \text{ kcal / h}$

**II) TD2 : CONDUCTION A TRAVERS UN CABLE****II.1 Objectif(s) visé (s) :**

- Appliquer les lois de conduction à travers un tube cylindrique
- Utiliser les notions théoriques pour résoudre un problème pratique

**II.2. Durée du TP :****1h 15 mn****ENONCE DU TD**

Un câble électrique cylindrique est constitué par un conducteur en cuivre de rayon

$r_1 = 0,5 \text{ cm}$ . Il est entouré d'une gaine de caoutchouc de rayon  $r_2 = 1 \text{ cm}$ , de conductivité thermique  $\lambda_1 = 0.13 \text{ W/m.K}$ , puis d'une gaine de coton de rayon  $r_3 = 1,1 \text{ cm}$  et de conductivité thermique

$\lambda_2 = 0.07 \text{ W/m}$ . Lorsque la température à la surface extérieure du coton est maintenue à  $20^\circ\text{C}$ , on ne veut pas dépasser  $100^\circ\text{C}$  au niveau du cuivre.

**Quel courant maximal peut en faire passer dans le câble.**

$R_e$  : résistance électrique de l'unité de longueur du conducteur =  $2 \cdot 10^{-4} \text{ ohm}$

Rép :

$R_{\text{caoutchouc}} = 0,85 \text{ }^\circ\text{C/w}$

$R_{\text{coton}} = 0,21 \text{ }^\circ\text{C/w}$

$R_{eq} = 1,06 \text{ }^\circ\text{C/w}$

$\Phi = 75,5 \text{ watts}$

Pour conserver l'équilibre thermique défini par les températures imposées, l'énergie thermique évacuée par conduction doit être égale à celle produite par effet Joules :

$$P = R_e (I_{max})^2 = \Phi$$

D'où :  $I_{max} = 600 \text{ A}$

### III) TD3 : CALCUL DU FLUX DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT

#### III.1. Objectif(s) visé(s) :

Appliquer les lois du rayonnement au cas d'un cylindre dans un four.

#### III.2. Durée du TP : 1h

#### ENONCE DU TD

Calculer la quantité de chaleur que reçoit par rayonnement un cylindre plein en laiton oxydé (100 mm de diamètre extérieur et 500 mm de hauteur), à une température  $T_1 = 200\text{ °C}$  s'il est contenu dans une chambre en brique de très grandes dimensions par rapport à celles du cylindre à une température  $T_2 = 1000\text{ °C}$

→ facteur d'émission  $\epsilon_{\text{cylindre}} = 0,6$

Rép :

$$\Phi = S_{\text{cylindre}} \times \epsilon_{\text{cylindre}} \times \sigma ((T_1)^4 - (T_2)^4)$$
$$S_{\text{cylindre}} = 0.173\text{m}^2$$
$$\Phi = 13155 \text{ Kcal /h}$$

**IV) TD4 : ISOLATION THERMIQUE ET CONFORT****IV.1.Objectif(s) visé(s) :**

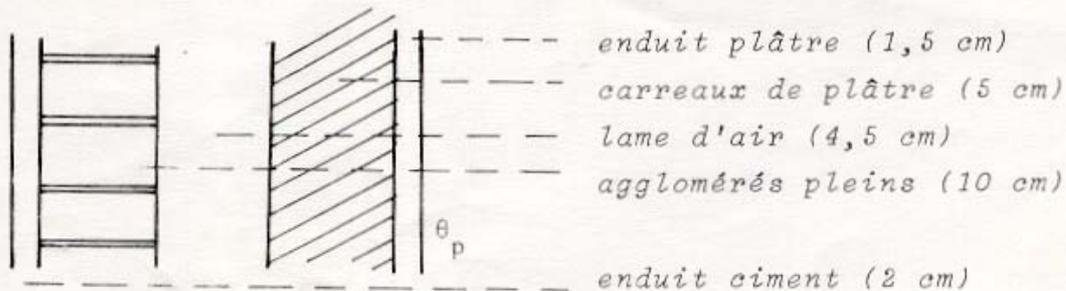
Appliquer les lois de conduction et de convection pour calculer le flux de chaleur entre l'air intérieur et l'air extérieur d'un bâtiment .

**IV.2.Durée : 3h**

**ENONCE DU TD**

Isolation thermique et confort.

A - Soit un mur de composition suivante :



-La température intérieure :  $\theta_i = +20^\circ\text{C}$

-la température extérieure :  $\theta_e = -10^\circ\text{C}$

**1)Isolation :**

- Calculer la résistance thermique total  $Req_1$  qui s'oppose à l'échange de chaleur entre le milieu extérieur .
- On remplace la lame d'air par 4,5 cm de fibre minérale. calculer  $Req_2$  .
- On définit le gain de calories par  $\eta = (Req_2 - Req_1) / Req_2$   
Calculer  $\eta$

**2) Confort :**

Il est admis par les physiologistes que dans le cas des murs, l'écart de température entre le milieu ambiant et la paroi du mur ( $\theta_i - \theta_p$ ) doit être inférieur à 3°C pour que l'échange par rayonnement entre notre corps et la paroi s'effectue normalement, sans impression de froid

a) Montrer que seul les murs comportant l'isolant en fibre minérale autorisent le confort thermique

b) Tracer la courbe de distribution des températures à l'intérieur du mur, pour les 2 cas .

**B - VITRAGE :**

1) Soit un vitrage simple se composant d'une vitre de 10 mm d'épaisseur.

a) calculer le coefficient de transmission global  $U_1$

b) calculer la quantité de chaleur qui s'échappe par  $m^2$  de vitrage pour une température intérieure de 20°C et une température extérieure de -10°C

2) On réalise un double vitrage de la façon suivante :

Vitre de 5mm – Lamme d'air de 20mm - Vitre de 5mm

a) Calculer le coefficient de transmission global  $U_2$

b) Calculer la quantité de chaleur qui s'échappe par  $m^2$

c) Calculer le gain de calories défini par :  $\frac{U_1 - U_2}{U_1}$

Données : Matériaux	$\lambda$ (kcal /h.m.°C)
Enduit ciment	1
Agglos – pleins	1,2
Carreaux de plâtre	0,4
Enduit plâtre	0,4
Fibres minérales	0,035
Verre	1

Résistances thermiques ( $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C / kcal$ )

Lamme d'air ( $\geq 2cm$ ) : 0,18  
 $1/h_i$  : 0,13  
 $1/h_e$  : 0,07

Rép :

A - Mur :

1°) a)  $Req_1 = 1/h_i + \sum e_i / \lambda_i + 1/h_e = 0,64 h \cdot m^2 \cdot ^\circ C / kcal$

b) En remplaçant la lame d'air par la même épaisseur de fibres minérales la résistance thermique totale devient :

$$R_2 = 0,64 - 0,18 + \frac{0,045}{0,035} = 1,75 \text{ h.m}^2 \cdot \text{°C.kcal}^{-1}$$

c) Gain de calories :  $\eta = \frac{1,75 - 0,64}{1,75} = 0,63$  soit 63%

2° a) Isolation par l'air :

$$\text{Pertes de chaleur : } \Phi = \frac{\Delta\theta}{R} = \frac{20 - (-10)}{0,64} = 46,9 \text{ kcal/h.}$$

La loi de la convection pour le film intérieur donne :

$$\Phi = h_i (20 - \theta_p) \text{ soit } (20 - \theta_p) \approx 6^\circ\text{C.}$$

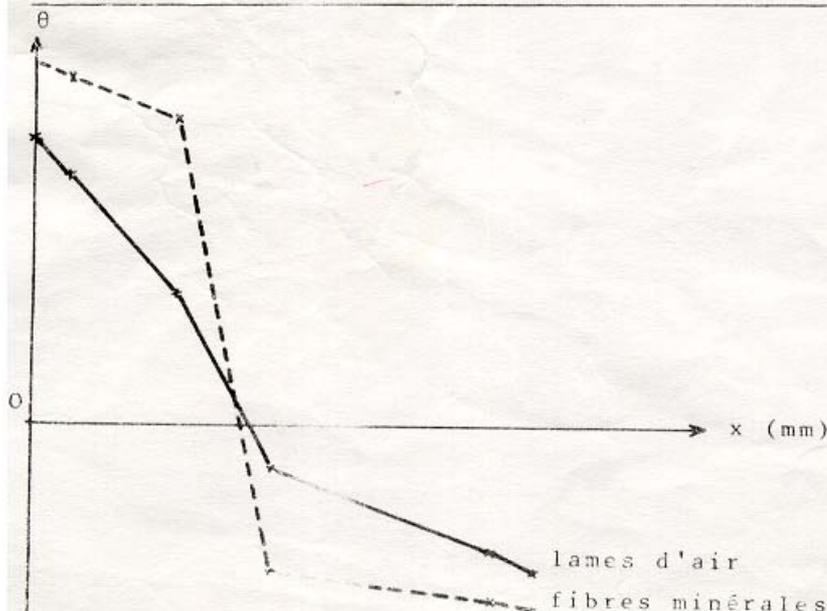
Dans le cadre des fibres minérales le même calcul donne :

$$\Phi = \frac{30}{1,75} \text{ soit } 20 - \theta_p = 2,2^\circ\text{C}$$

valeur bien inférieure à l'écart  $(\theta_i - \theta_p)$  autorisé.

b) On peut calculer de proche en proche les températures aux interfaces des matériaux à l'aide de la loi de Fourier en partant de la face intérieure du mur pour les deux cas envisagés et tracer les courbes de distribution suivantes :

x (mm)	0	15	65	110	210	230
lame d'air	14	12°2	6°5	- 2°	- 6°	- 6°9
fibres minérales	17°8	17°1	15	- 7	- 8,4°	- 8°8



B - Vitrage :

1°) Pour le vitrage simple,

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} = \frac{1}{0,13 + \frac{10^{-2}}{1} + 0,07}$$

$$U_1 = 4,76 \text{ kcal.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$$

$$\Phi = U \Delta \theta = 4,76 \times 30 = 142,8 \text{ kcal/h.m}^2$$

2°) Pour le double vitrage,

$$U_2 = \frac{1}{0,13 + \frac{5,10^{-3}}{1} + 0,18 + \frac{5,10^{-3}}{1} + 0,07} = \frac{1}{0,38}$$

$$U_2 = 2,63 \text{ kcal.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$$

$$\Phi = U_2 \Delta \theta = 2,73 \times 30 = 78,9 \text{ kcal/h.m}^2$$

$$\eta = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{4,76 - 2,63}{4,76} = 0,45 \text{ soit } 45\% \text{ d'économie}$$

**V) TD5 : REFROIDISSEMENT DU BENZENE.**

**1) objectif(s) visé s()**

Calculer la surface d'échange et l'efficacité d'un échangeur

**2) durée : 1h30**

**ENONCE DU TD :**

Du benzène à la température de 70 °C, circule avec un débit de 3000 kg/h dans un échangeur tubulaire simple où il va être refroidi par de l'eau qui entre à 15°C avec un débit de 2000 Kg/h

**1°) Fonctionnement à co-courant :**

- a) Déterminer la température limite  $\theta_{lim}$  que l'on obtiendrait avec un échangeur de surface infinie.
- b) En s'imposant une température de sortie du benzène de 37°C, déterminer la température de sortie de l'eau ainsi que la surface d'échange nécessaire
- c) Calculer l'efficacité de refroidissement  $\eta_r$

**2°) Fonctionnement à contre courant :**

- a) Pour les mêmes conditions de température, déterminer la surface d'échange nécessaire
- b) Calculer l'efficacité de refroidissement  $\eta_r$

Données : C benzène = 0,44 kcal/ kg. °C  
 Ceau = 1kcal / kg. °C)  
 Echangeur : U=750 kcal /hm<sup>2</sup>°C

- Rép :
- 1) a)  $\theta_{lim}=36$   
 b)  $\theta_2 = 36,8^\circ\text{C}$        $\Delta\theta_m = 9,8^\circ\text{C}$        $S = 5,9$   
 c)  $\eta_r = 0,997$
  - 2) a)  $\Delta\theta_m = 27,2^\circ\text{C}$        $S = 2,1\text{ m}^2$   
 b)  $\eta_r = 0,6$

**EVALUATION DE FIN DE MODULE****Exercice 1**

Le mur d'une maison constitué d'une couche de brique de 22cm est recouvert sur la face interne d'une couche de plâtre de 1cm d'épaisseur et sur la surface externe de 1,5cm de crépi

Données :

Matériaux	Coefficient de conductivité $\lambda$ (kcal / h.m.°C)
plâtre	0,4
brique	0,45
crépi	0,5

\* Coefficient de convection entre la face interne du mur et l'air intérieur :  $h_i = 7,69 \text{ kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

\* Coefficient de convection entre la face externe du mur et l'air extérieur :  $h_e = 14,29 \text{ kcal/h.m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

\*Température de l'air intérieure :  $\theta_i = +20^\circ\text{C}$

\*Température de l'air extérieur :  $\theta_e = -10^\circ\text{C}$

\*Surface du mur :  $10 \text{ m}^2$

1) Donner l'expression du coefficient global de transmission

2) Calculer de coefficient .

3) Calculer le flux de chaleur échangé entre l'air intérieur et l'air extérieur à travers le mur considéré.

**EXERCICE 2**

La paroi d'un four en briques réfractaires (facteur d'émission 0,75) est en regard d'un mur en briques de construction (facteur d'émission 0,45) de même aire.

Calculer le flux de chaleur échangé par unité de surface si la température de la paroi externe du four est  $60^\circ\text{C}$  et celle du mur est  $17^\circ\text{C}$

Constante de stéphan Boltzman :  $\sigma = 4,92 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K}^4$

**EXERCICE 3**

Par inculcation dans un tube d'aciers entouré de vapeur se condensant à  $104^\circ\text{C}$ , une huile est portée de  $18^\circ\text{C}$  à  $28^\circ\text{C}$

Données : - Tube \* diamètre intérieur  $12,5 \text{ mm}$

\* diamètre extérieur :  $16 \text{ mm}$

\* longueur :  $2,4$

\* coefficient de conductivité :  $\lambda = 40 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$

- Huile \*  $C = 0,5 \text{ kcal/ky.}^\circ\text{C}$

\* débit :  $270 \text{ ky/h}$

\*Coefficient de convection tube- vapeur :  $h_e = 5000 \text{ kcal/ hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

1) Calculer le flux de chaleur échangé .

2) Calculer le coefficient global de transmission  $U_e$

3) En déduire le coefficient de convection tube- huile  $h_i$

4) Calculer la température de la paroi interne du tube  $\theta_p$

### LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrage	Auteur	Edition
Traité de chauffage et de climatisation	H. Rietschel W. raiss	DUNOD
Mémotech : Génie énergétique	P. Dal Zatto J.M. LARRE A. MERET L. PICAU	DUNOD
LE RECKNAGEL : Manuel Pratique du Génie Climatique	RECKNAGEL SPRENGER SCHRAMEK	P Y C
Notice Technique sur les Centrales Thermiques Fascicule N°=2B	Electricité de FRANCE Service de la Production Thermique	