

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

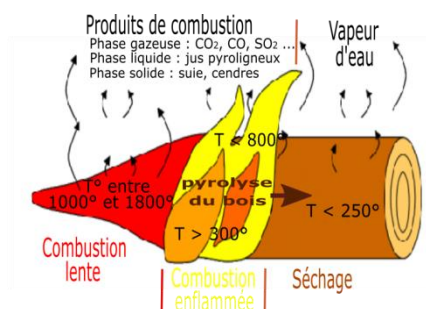
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



**Université de Saida -D<sup>r</sup> Moulay Tahar**

*Faculté de Technologie*

*Département de Génie des Procédés*



# Technologie des fours industriels

« Cours et exercices »

*Préparé par*

*D<sup>r</sup> Fatima Zohra CHOUMANE*

**Année Universitaire 2022-2023**

## **PREAMBULE**

Notre propagation sur terre passe par la carbonisation des espèces végétales supérieures et, d'une manière plus générale, par l'incessante combustion de toutes substances combustibles. De la première lampe-tempête jusqu'aux réverbères du XVIIIème siècle, et de la lueur des réverbères jusqu'au blême éclat des lampadaires qui éclairent les autoroutes, tout est combustion, et la combustion est le principe intime de tout objet fabriqué par nous.

*Les Anneaux de Saturne (1995) de W. G. Sebald*

### **Public cible :**

L'objectif de ce polycopié des cours est de fournir à l'étudiant une vision claire sur la combustion, sur les différents fours de l'industrie des matériaux, sur leurs caractéristiques physico-chimiques pour pouvoir décrire leur utilisation.

Ce polycopié est destiné aux étudiants en formation de génie des procédés, génie chimiques, raffinage et pétrochimie et à tout public, s'intéressants à l'étude des phénomènes de combustion et transfert de chaleur dans les fours industriels qui sont à l'origine des méthodes de fabrication, mise en forme et obtention des différents types des matériaux.

### **Pré-requis :**

Les fours sont la pièce maitresse dans l'industrie des matériaux. Dans cette optique, l'étudiant doit en mesure de savoir :

- La combustion et ses réactions chimiques, calcul de combustion, les combustibles, le pouvoir calorifique, température réelle de combustion,
- Les notions de transfert de chaleur, de la chimie organique et de la thermodynamique appliquée
- Classe et structure des matériaux
- Classification des fours selon la circulation des fumées.
- l'étudiant doit être capable de faire un bilan énergétique d'un four pour essayer de minimiser la chaleur perdue.

### **Contenu :**

Ce polycopié contient des résumés de cours, il traite en particulier, les notions sur la combustion, le transfert de chaleur, les différents types des fours, calcul énergétique et isolation des fours.

Le chapitre **I** se rapporte des phénomènes de la combustion,

Le chapitre **II** traite les différents types fours,

Le chapitre **III** est réservé au transfert du chaleur dans les fours,

Les chapitre **IV** et **V** sont consacrés à l'étude des calculs thermique et l'isolation des fours.

Ce polycopié de cours représente une synthèse des cours que j'ai assurés au sein du département de génie des procédés à l'université de Saida D<sup>r</sup> Moulay Tahar. C'est un travail qui émane de mon expérience en tant qu'enseignante des cours de module technologie des fours industriels.

### **Compétences visées**

- Les étudiants en formation de génie des procédés seront capables de dimensionner un four. Ils auront également des notions de transfert de chaleur.
- Etre capables d'écrire des bilans de matière et d'énergie
- D'avoir des notions sur les différents fours de l'industrie des matériaux, sur leurs caractéristiques physico-chimiques pour pouvoir décrire leur d'utilisation

### **Mots-clés**

Matériaux, Bilans, Transfert de chaleur, Fours, Dimensionnement, Isolation,

### ***L'auteur***

**Fatima Zohra CHOUMANE** est une enseignante chercheur, maitre de conférences à l'université D<sup>r</sup> Moulay Tahar de Saida, où elle a assuré des cours sur les technologies des fours industriels aux étudiants de première année master spécialité génie des procédés et matériaux (GPM).

## Sommaire

### Liste des figures- liste des tableaux

## Chapitre 1. Combustion dans les fours industriels

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 1. Notions sur la combustion                        | 7  |
| 2. Condition nécessaire pour obtenir une combustion | 7  |
| 3. Nature et composition de l'air comburant         | 7  |
| 4. Les combustibles : solides, liquides, gazeux     | 7  |
| 5. Les réactions de combustion                      | 8  |
| 7. Les différents types de combustion               | 9  |
| 8. Grandeurs de la combustion                       | 10 |
| 9. Four à combustible                               | 12 |
| 10.L'enthalpie de formation                         | 13 |
| 13.Température de flamme                            | 13 |
| 14.Les Pouvoir calorifique                          | 14 |
| 16.Pouvoir comburivore                              | 15 |
| 17.Pouvoir fumigène                                 | 15 |
| 18.L'entropie absolue                               | 15 |
| 19.Le diagramme d'OSWALD                            | 16 |
| 20. Procédés de combustion                          | 17 |
| <b>Exercices</b>                                    | 18 |

## Chapitre 2. Classification des fours

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 1. Introduction       | 24 |
| 2. Définition         | 24 |
| 3. Le four industriel | 24 |
| 4. Fonctionnement     | 24 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 5. Usages des fours et étuves                       | 25 |
| 6. Classification                                   | 26 |
| 6.1. Classification selon la manutention du produit | 26 |
| 6.2. Classification selon le mode de chargement     | 29 |
| 6.3. Fours à chauffage direct et indirect           | 29 |
| 6.4. Fours à haute et basse température             | 30 |
| 6.5. Les combustibles utilisés                      | 30 |

### ***Chapitre 3. Transfert de chaleur dans les fours***

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Rappel                                                        | 32 |
| 2. La conduction                                                 | 32 |
| 3. Le rayonnement thermique                                      | 32 |
| 4. La convection                                                 | 33 |
| 5. Fours à haute température                                     | 33 |
| 6. Fours à basse température                                     | 34 |
| 7. Rôle de la conduction                                         | 36 |
| 8. Chauffage à courants parallèles et chauffage à contre-courant | 37 |
| 9. Fours discontinus                                             | 38 |
| <b>Exercices</b>                                                 | 39 |

### ***Chapitre 4. Calcul thermique des fours***

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. Introduction                | 45 |
| 2. Bilan énergétique           | 45 |
| 3. Rendement énergétique       | 45 |
| 4. Rendement de combustion     | 46 |
| 5. Flux thermiques admissibles | 50 |
| 6. Qualité du chauffage        | 51 |
| 7. Puissance installée         | 51 |
| 8. Dimensionnement des fours   | 53 |
| <b>Exercices</b>               | 55 |

## ***Chapitre 5. Isolation des fours***

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 1. Conception générale                            | 60 |
| 2. Définitions                                    | 60 |
| 3. Physique des matériaux réfractaires            | 60 |
| 4. Chimie des matériaux réfractaires              | 61 |
| 5. Interactions entre les réfractaires et le four | 62 |
| 6. Dimensionnement des parois réfractaires        | 63 |
| <b>Exercices</b>                                  | 64 |
| <b>Conclusion</b>                                 | 66 |
| <b><i>Références bibliographiques</i></b>         | 67 |

---

## Liste des figures

---

Figure 1. Les éléments de base d'un four à combustible

Figure 2 : Diagramme d'OSTWALD du FOD

Figure 3. Four discontinu à cloche cylindrique

Figure 4 : Four discontinu à sole élévatrice

Figure 5: Four discontinu à sole mobile

Figure 6 : Four continu à pousseuse

Figure 7 : Four continu à traction de feuillard

Figure 8 : Fours à chauffage direct et indirect

Figure 9 : Ventilateur de circulation de gaz dans un four de réchauffage de pièces en métaux non ferreux

Figure 10 : Brûleur à grande vitesse et positionnement de ces brûleurs autour d'une charge cylindrique

Figure 11 : Puissance installée

---

## Liste des tableaux

---

**Tableau 1 :** Caractéristiques des combustibles

**Tableau 2.** Résistance pyroscopique des matériaux réfractaires silico-alumineux en fonction de leur teneur en alumine

## Chapitre 1. Combustion dans les fours industriels

### 1. Notion sur la combustion

La combustion est une réaction chimique d'oxydation exothermique, c'est l'oxydation d'un combustible (par exemple la matière végétale) avec un comburant (par exemple l'oxygène de l'air).

#### ➤ *But de la combustion*

La combustion d'un corps porté à une température suffisante permet une production de chaleur.

### 2. Condition nécessaire pour obtenir une combustion

Il y a trois conditions qui doivent être réunies simultanément pour que la combustion soit possible :

**Le combustible** : matière capable de se consumer (de brûler)

**Le comburant** : corps qui se combinant avec un combustible permet la combustion

**La source d'énergie** : énergie nécessaire au démarrage de la réaction chimique de la combustion.

**Remarque** : L'absence d'un des trois éléments empêche le déclenchement de la combustion

### 3. Nature et composition de l'air comburant

Le comburant est l'air atmosphérique dont la composition est la suivante :

Oxygène :  $O_2$

Dioxyde de carbone :  $CO_2$

Azote :  $N_2$

Gaz rares : Néon, Krypton...

### 4. Les combustibles : solides, liquides, gazeux

On distingue les combustibles solides, liquides et gazeux ; on peut les subdiviser en trois classes : le charbon, les hydrocarbures liquides, et les hydrocarbures gazeux.

Les hydrocarbures liquides ou gazeux d'usage courant sont des mélanges de plusieurs hydrocarbures.

La plupart des hydrocarbures liquides sont obtenus par distillation et cracking du pétrole brut. À partir de ce dernier, on obtient donc une variété de combustibles dont les plus communs sont l'essence, le kérosène, le gazole et le fuel lourd.

Les combustibles gazeux proviennent principalement soit de gisements de gaz naturel, soit de procédés chimiques de fabrication. Le gaz naturel est constitué principalement de méthane, contrairement aux gaz de transformation.

La composition générale des combustibles courants est donnée ci-dessous :

**Tableau 1 : Caractéristiques des combustibles**

| Etat                  | Solide                         | Liquide                                    | Gaz                                                                                           |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Constituants          | C, H <sub>2</sub> O, Cendres   | C ; H <sub>2</sub> ; S                     | Hydrocarbures<br>Mélanges C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> ,<br>N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> |
| Combustibles courants | Charbons,<br>Anthracites, Bois | Fioul Domestique<br>Fiouls Lourds n°1 et 2 | Gaz naturels,<br>Butane et Propane<br>commerciaux, Air<br>propané                             |

**Exemple :** gaz naturel = CH<sub>4</sub> majoritairement

Bois « sec » : en moyenne 19% d'eau, 1% de cendres, 40% de Carbone, 5% d'Hydrogène, 35% d'Azote et d'Oxygène, mais la teneur en eau peut varier de quelques pour cents.

### 5. Réaction de combustion

Les réactions de combustion se font sans variation de masse de chacun des éléments. Une combustion est une réaction chimique. On peut écrire le bilan de la réaction de combustion :

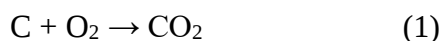
Réactifs → Produits

**Combustible + Comburant → Produits de la réaction**

Combustible + Comburant → Produits de Combustion + chaleur

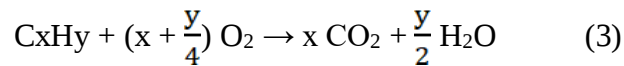
Gaz, bois...      Air      →      CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, ...

À titre d'exemple, les réactions de combustion du carbone et du méthane sont respectivement



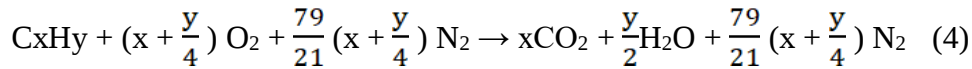
On distingue dans une telle réaction, les réactifs, qui subissent la réaction, et comburant, qui est le corps contenant l'agent oxydant, le plus fréquemment l'air. Les produits de la combustion d'hydrocarbures comprennent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et de l'eau, qui selon les conditions de pression et de température, pourra être sous forme liquide ou vapeur.

Pour un hydrocarbure composé uniquement de carbone et d'hydrogène, de formule C<sub>x</sub> H<sub>y</sub>, la réaction de combustion s'écrit :



On considère que l'air est composé de 21% d'oxygène et de 79% d'« azote atmosphérique » auquel on attribue une masse molaire fictive pour tenir compte de la présence d'argon.

La réaction de combustion d'un hydrocarbure avec l'air devient donc



### 6. Produits de combustion (fumées)

Les produits de combustion (fumées) sont constitués de :

➤ **Principalement :**

Dioxyde de carbone :  $CO_2$

Vapeur d'eau  $H_2O$

Azote  $N_2$

➤ **Eventuellement :**

Oxyde de soufre  $SO_2$

Oxygène  $O_2$

Monoxyde de carbone  $CO$

$NO_x$ ,  $NO$ ,  $NO_2$

Hydrogène libre  $H_2$

Imbrulés solides ou gazeux.

La présence et le pourcentage de ces constituants présents dans les produits de combustion permettront :

- a) De définir le type de combustion
- b) D'envisager les risques potentiels :
  - d'asphyxie pour les personnes
  - de corrosion du matériel (chaudière, conduit de fumées)
  - de pollutions atmosphériques
- c) D'affiner les réglages du brûleur et d'améliorer les rendements.

### 7. Les différents types de combustion

Il ne suffit pas de mettre en présence un combustible, de l'air et une étincelle pour réaliser une bonne combustion : Selon la quantité d'air, les réglages de l'appareil de combustion, la cheminée..., la combustion sera de plus ou moins bonne « qualité », c'est-à-dire :

- Sans produit toxique pour l'homme ou l'environnement dans les fumées
- Avec un bon rendement

C'est pour cette raison que l'on étudie les différents types de combustion

- **La combustion est *complète*** si la totalité du combustible est oxydée.
- **La combustion est *incomplète*** s'il y a présence de combustible dans les fumées, ou si certains composants sont partiellement oxydés (ex : CO)
- **La combustion est dite *stœchiométrique*, neutre ou *théorique*** si l'air comburant est en quantité suffisante et strictement nécessaire à la combustion complète de l'unité de combustible. Les fumées ne contiennent pas d'oxygène.
- **La combustion est dite « avec flammes » ou « vive »** lorsque les gaz de décomposition thermique s'oxydent
- **La combustion est dite « sans flammes » ou « lente »** lorsque l'oxydation concerne les résidus de cette décomposition thermique.

Au cours d'incendies de forêt ou de brûlages contrôlés, la majeure partie de la combustion est « vive », la phase « lente » se rencontre toutefois au niveau de la couverture morte ou lorsque le feu couve dans les racines.

La pyrolyse (destruction par le feu) : c'est la décomposition chimique, en vase clos, de la matière sous l'effet de la chaleur seule. Au cours d'incendies de forêt ou de brûlages contrôlés, ce phénomène se produit rarement mais la gazéification observée s'y apparente.

- **La combustion est *oxydante* ou *en excès d'air*** si une partie de l'air comburant est utilisé pour l'oxydation du combustible, l'autre partie se retrouvant dans les fumées.  
**Excès d'air:** c'est la quantité d'air au-delà de la stœchiométrie nécessaire à la combustion complète du combustible. Cet excès d'air est en général de 2 à 10% sur les équipements de chauffe industriels. Un trop faible excès d'air peut conduire à une combustion incomplète, des fumées noires, un étouffement du four. Un trop large excès d'air conduit essentiellement à une perte de rendement.
- **La combustion est dite *réductrice* ou *en défaut d'air*** si le volume d'air admis pour la combustion de l'unité de combustible est inférieur au volume d'air stœchiométrique ; l'oxygène y est néanmoins totalement utilisé donc pas de présence d'O<sub>2</sub> dans les fumées, mais il y a formation de monoxyde de carbone (CO).

### 8. Grandeurs de la combustion

- a. **Le facteur d'air, ou taux d'aération (N)**, est le rapport du volume d'air réellement utilisé (R) sur le volume d'air théorique (V<sub>a</sub>).

$$N = \frac{R}{V_a}$$

En combustion stœchiométrique :  **$R = V_a$**

$$N = \frac{R}{V_a} = 1$$

En combustion oxydante :  **$R > V_a$**  (excès d'air)

$$N = \frac{R}{V_a} > 1$$

En combustion réductrice :  **$R < V_a$**  (défaut d'air)

$$N = \frac{R}{V_a} < 1$$

b. **L'excès d'air (  $E_a$  ),** est le rapport du volume d'excès d'air (  **$V_{ea}$**  ) sur le volume d'air théorique (  **$V_a$**  ).

$$E_a = \frac{V_{ea}}{V_a}$$

$$N = \frac{R}{V_a}$$

Or,

$$N = \frac{R}{V_a} = \frac{V_a + V_{ea}}{V_a} = 1 + \frac{V_{ea}}{V_a} = 1 + E_a$$

$$\mathbf{N = 1 + E_a \quad ou \quad E_a = N - 1}$$

D'où

c. **Le défaut d'air (  $D_a$  ),** est le rapport du volume de défaut d'air (  **$V_{da}$**  ) sur le volume d'air théorique (  **$V_a$**  ).

$$D_a = \frac{V_{da}}{V_a}$$

Or, 
$$N = \frac{R}{V_a} = \frac{V_a - V_{da}}{V_a} = 1 - \frac{V_{da}}{V_a} = 1 - D_a$$

$$\mathbf{N = 1 - D_a \quad ou \quad D_a = 1 - N}$$

D'où

**Remarque :**

- Lorsque l'excès d'air augmente :

Le volume de fumées sèches augmente,

Le volume de  $\text{CO}_2$  ne bouge pas.

- La teneur en  $\text{CO}_2$  dans les fumées sèches varie selon l'excès d'air.

Plus l'excès d'air est fort plus la teneur est basse.

Si l'excès d'air est nul la teneur est maximale et l'on parle de «  $\text{CO}_2$  neutre » ou «  $\text{CO}_2$  max » qui dépend de la composition du combustible utilisé.

- Lorsque l'excès d'air augmente :

Le volume de fumées sèches augmente,

Le volume d' $\text{O}_2$  dans les fumées augmente.

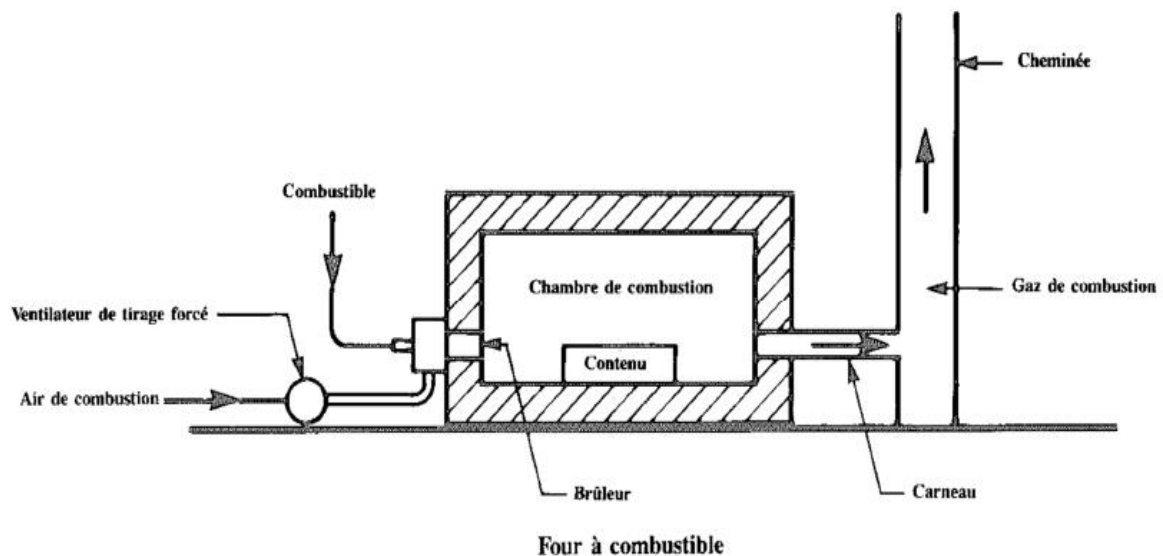
- La teneur en  $\text{O}_2$  dans les fumées sèches varie selon l'excès d'air.

Plus l'excès d'air est fort plus la teneur est élevée.

La teneur en  $\text{O}_2$  dans les fumées pourra varier de 0 à 21 % selon qu'il n'y a pas d'excès d'air ou que celui-ci est infini. (Phase de pré-ventilation par exemple)

### 9. Four à combustible

Les éléments de base d'un four à combustible sont présentés dans la figure 1.



**Figure 1.** Les éléments de base d'un four à combustible

Lorsque la chaleur est produite par combustion, le four, le sécheur ou le four de cuisson est équipé d'une chambre de combustion dans laquelle brûle un combustible. Ce dernier, admis au niveau du brûleur, est mélangé avec de l'air puis est allumé. Il s'agit habituellement de gaz naturel ou de mazout ou d'autres produits. Le produit peut être exposé directement à la chaleur

générée dans la chambre de combustion ou indirectement par le biais d'un échangeur de chaleur pour éviter une exposition directe au gaz de combustion.

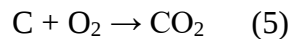
### 10. L'enthalpie de formation

On désigne l'enthalpie de formation  $e$  par le symbole  $h_f^0$

Considérons la combustion de carbone solide avec de l'oxygène dans un système ouvert stationnaire.

On suppose que les deux réactifs entrent dans la chambre de combustion à l'état de référence, et que le dioxyde de carbone formé sort à l'état de référence également.

L'équation chimique de réaction étant



La mesure de la chaleur échangée nous fournit donc la différence d'enthalpie entre les produits (P) et les réactifs (R) aux conditions de référence. Supposons que l'on attribue une valeur nulle à l'enthalpie des corps simples.

$$\sum_P \dot{n}_s \bar{h}_s - \sum_R \dot{n}_e \bar{h}_e$$

$$n_C \bar{q} = \sum_P n_s \bar{h}_s - \sum_R n_e \bar{h}_e = n_{CO_2} \bar{h}_{CO_2} - n_C \bar{h}_C - n_{O_2} \bar{h}_{O_2}$$

**11. La chaleur spécifique** : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme de combustible de 1°C. Par définition, celle de l'eau est de **1 cal. g<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>** ou de **4,18 J. g<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>**

**12. La chaleur latente de vaporisation** : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un corps de l'état liquide à l'état gazeux. Dans les conditions normales de température et de pression, celle de l'eau est de 2 260 J.g<sup>-1</sup>.

### 13. Température de flamme:

Soit une réaction de combustion se produisant adiabatiquement, sans travail ni variation d'énergie cinétique et potentielle. La température des produits d'une telle réaction est appelée **température adiabatique de flamme** ou **de combustion**. En vertu des hypothèses d'absence de travail et de variations d'énergie cinétique et potentielle, il s'agit de la température maximum qui peut être atteinte pour les réactifs donnés. Pour un combustible donné et des pressions et température des réactifs donnés, la température adiabatique de flamme est maximale pour un mélange stœchiométrique. La température adiabatique de flamme peut être contrôlée par l'excès d'air utilisé.

En outre, la température peut être estimée en considérant que la chaleur dégagée par la combustion est intégralement fournie aux produits de la combustion au niveau de la flamme, sous forme de chaleur sensible (et/ou latente). Les produits de la combustion cèdent ensuite une part de leur énergie par rayonnement dans le foyer, une autre partie de leur énergie par convection/conduction, et en conservent une partie en quittant la chaudière à température plus ou moins importante.

### 14. Les pouvoirs calorifiques :

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

→ Notation :  $PC$

→ Unité :  $[kJ/kg(n)]$  de combustible] ou  $[kJ/m^3(n)]$  de combustible]

→ Remarque : (n) signifie que toutes les réactions se produisent dans les conditions normales de température et de pression.

On utilise souvent les expressions chaleur de réaction ou pouvoir calorifique, qui désignent la chaleur extraite de la chambre de combustion durant une combustion à température constante. Dans le cas d'une combustion isobare, la chaleur est égale à l'opposée de l'enthalpie de combustion. On l'appelle pouvoir calorifique isobare. Dans le cas d'une combustion à volume constant, la chaleur échangée est égale à l'opposé de l'énergie interne de combustion. On l'appelle pouvoir calorifique isochore.

Le pouvoir calorifique est dit *inférieur (PCI)* quand l'eau résultant de la combustion de l'hydrogène et des hydrocarbures est supposée à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

Le pouvoir calorifique est *supérieur (PCS)* quand cette eau de combustion est ramenée à l'état liquide dans les fumées.

$$PCS - PCI = m_{H_2O} \cdot L_v$$

$L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$  aux CNTP

### *Masse d'eau contenue dans les fumées*

Elle dépend de la quantité d'hydrogène présente dans le combustible

**Exemple** :  $m(H_2O) = 1,6 \text{ kg}$  dans les fumées pour la combustion de  $1 \text{ m}^3(n)$  de gaz naturel

### **Quelques PCI/PCS**

Gaz naturel : PCI et PCS d'environ  $10.2 \text{ kWh} / \text{m}^3(n)$  et  $11.3 \text{ kWh} / \text{m}^3(n)$

Fioul domestique : PCI et PCS d'environ 10 kWh / l(n) et 11 kWh / l(n)

**15. La puissance du front de feu (loi de Byram) :** elle est égale au produit de l'énergie libérée par la vitesse de progression du front de feu. Elle est classiquement déterminée par la formule suivante :

$$P_f = PCI \times M \times V_f \quad (6)$$

Avec,

$P_f$  : puissance du feu par mètre linéaire de front, en W. m<sup>-1</sup>

$PCI$  : pouvoir calorifique inférieur du combustible sec, en J. g<sup>-1</sup>

$M$  : masse sèche disparue au cours de la combustion, en g. m<sup>-2</sup>

$V_f$  : vitesse de propagation du front de feu, en m. s<sup>-1</sup>

- **Le débit calorifique** : est la quantité de chaleur libérée par unité de temps, il s'exprime en Watts.
- **Le flux calorifique** : rapporte le débit calorifique à l'unité de surface émissive, il s'exprime donc en W.m<sup>-2</sup>

**16. Pouvoir comburivore** : c'est la quantité d'air nécessaire pour brûler une quantité unitaire de combustible, en kg d'air par kg de combustible (pour les solides) ou en Nm<sup>3</sup> d'air par Nm<sup>3</sup> de combustible (pour les gaz).

**17. Pouvoir fumigène** : c'est la quantité de fumées produites par la combustion à l'air d'une quantité unitaire de combustible, en kg de fumées par kg de combustible ou Nm<sup>3</sup> de fumées par Nm<sup>3</sup> de combustible.

### 18. L'entropie absolue

Il est nécessaire d'invoquer le troisième principe de la thermodynamique, formulé à la suite des travaux de Nernst et Planck, selon lequel l'entropie d'un cristal parfait est nulle au zéro absolu. Ce principe fournit donc un point de référence absolu à partir duquel on peut évaluer l'entropie d'une substance.

L'entropie définie de la sorte est désignée sous le nom d'entropie absolue. On peut la déterminer expérimentalement par des mesures calorimétriques ou à l'aide de la thermodynamique statistique. Les entropies absolues des solides et liquides aux conditions normales sont disponibles dans la littérature. Elles sont désignées par le symbole  $S^\circ$ . On en déduit l'entropie absolue à une pression quelconque par l'expression

$$\bar{s}_{p,T} = \bar{s}_T^\circ - \bar{R} \ln \left( \frac{p}{p_0} \right)$$

### 19. Le diagramme d'Ostwald

Pour caractériser facilement la qualité de la combustion d'une installation, on mesure les taux  $\gamma$   $\text{CO}_2$  et  $\gamma$   $\text{O}_2$  dans les fumées, à l'aide d'un analyseur de fumées.

Ensuite, le diagramme permet d'obtenir en fonction du  $\gamma$   $\text{CO}_2$  mesuré et du  $\gamma$   $\text{O}_2$  mesuré :

Le type de combustion réelle

Le % d'excès d'air ou de défaut d'air

Le  $\gamma$   $\text{CO}$  (s'il y a lieu)

Il est défini pour un combustible donné, l'axe des abscisses représente le  $\gamma$   $\text{O}_2$  et celui des ordonnées représente le  $\gamma$   $\text{CO}_2$ . Il comporte en général :

- La droite des combustions oxydantes ( $\gamma$   $\text{CO} = 0\%$ ) graduée en excès d'air,
- Une graduation en défaut d'air sur l'axe vertical ( $\gamma$   $\text{O}_2 0\%$ ),
- Le point représentatif de la combustion neutre ( $\gamma$   $\text{O}_2 = 0\%$  et  $\gamma$   $\text{CO} = 0\%$ ) pour  $\gamma$   $\text{CO}_{2\text{max}}$ ,
- Les droites d'égale teneur en  $\text{CO}$  ( $\gamma$   $\text{CO} = \text{cte}$ ) parallèle à la droite des combustions oxydantes,
- Les droites d'égale excès ou défaut d'air

Les diagrammes d'OSTWALD sont applicables à tous les combustibles, ils sont insensibles aux teneurs en eau et en cendres des combustibles solides, mais ne sont plus utilisables si la teneur en imbrûlés solides dépasse 3%. Les diagrammes pratiques sont limités à leur partie utile ( $\gamma \text{O}_2 < 21\%$ ).

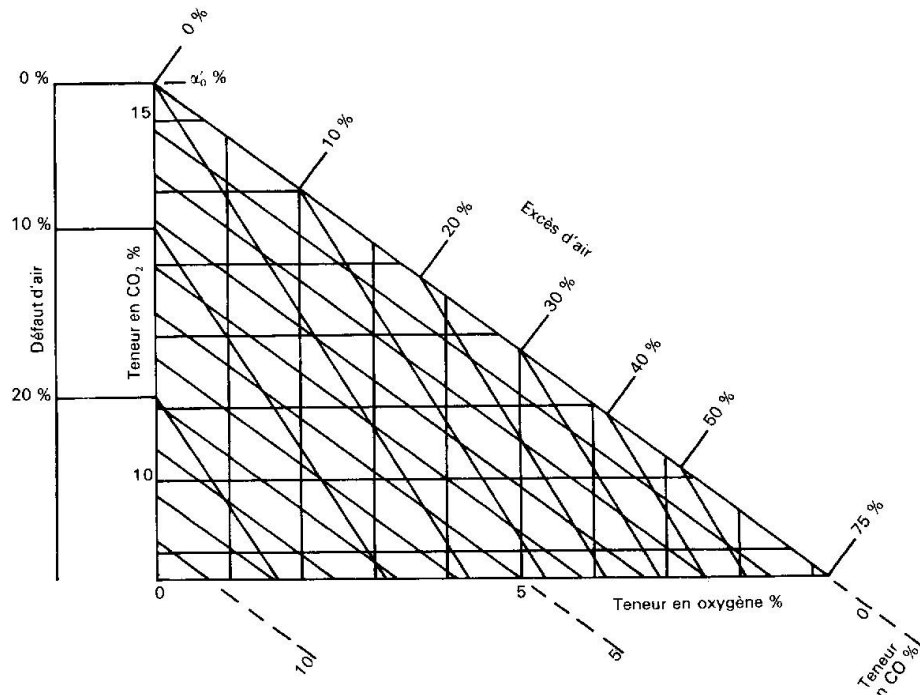


Figure 2 : Diagramme d'OSTWALD du FOD

**Exemple :** On mesure  $\gamma_{CO_2} = 11\%$  et  $\gamma_{O_2} = 6\%$

Sur le diagramme, on place le point, qui sur la diagonale supérieure : La combustion est donc complète, avec 38 % d'excès d'air, et 0% de CO

En fonction de la fiche technique du matériel de combustion, on peut ensuite modifier les réglages pour diminuer l'excès d'air.

## 20. Procédés de combustion

On caractérise l'efficacité d'un procédé réel de combustion au moyen de divers paramètres, selon l'application considérée.

**Chambre de combustion (turbine à gaz) :** dans ce cas, si la combustion était complète et adiabatique, la température de sortie serait la température adiabatique de flamme. En réalité, la combustion n'est pas parfaite (formation d'oxydes d'azote p. ex.) et il se produit une perte de chaleur vers l'ambiance, de sorte que la quantité de combustible nécessaire pour obtenir une température donnée est plus élevée que pour une combustion complète et adiabatique.

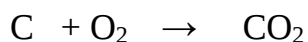
**Générateur de vapeur :** dans ce cas, l'objectif est de transmettre un maximum de chaleur à la vapeur d'eau.

**Moteur volumétrique à combustion interne :** Pour un moteur, l'effet utile est le travail fourni. La manière logique de caractériser sa performance serait par conséquent d'employer son rendement exégétique.

## Exercices

### Exercice 1

La réaction chimique bilan entre le carbone C dans le dioxygène O<sub>2</sub> se fait selon :



- 1- Quel est le combustible ?
- 2- Quel est le comburant ?
- 3- Quel est le produit
- 4- Quels sont les réactifs ?
- 5- Comment on peut prouver la présence de ce produit ?

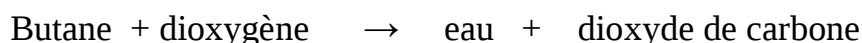
### Réponse

- 1- Quel est le combustible ? Le carbone
- 2- Quel est le comburant ? Le dioxygène
- 3- Quel est le produit ? Le dioxyde de carbone
- 4- Quels sont les réactifs ? Le carbone et le dioxygène
- 5- Comment on peut prouver la présence de ce produit ?

On utilise l'eau de chaux, car le dioxyde de carbone trouble l'eau de chaux.

### Exercice 2

La combustion complet du butane est une réaction chimique (transformation chimique) qui produit une grande quantité de la chaleur,



- 1- Dans ce cas quelle est la couleur de la flamme (feu)
- 2- Comment est la quantité l'air (dioxygène)
- 3- Quel est le comburant ? .....
- 4- Quel est le combustible ? .....
- 5- Quels sont les réactifs ?
- 6- Quels sont les produits .....
- 7- Comment on peut prouver la présence de ces produits ?
- 8- Ecrire cette réaction bilan en utilisant les formules chimiques

### Réponse

La combustion complète du butane est une réaction chimique (transformation chimique) qui produit une grande quantité de la chaleur,

Butane + dioxygène → eau + dioxyde de carbone

1- Dans ce cas quelle est la couleur de la flemme (feu) :Bleu

2- Comment est la quantité l'air (dioxygène)

Suffisante

3- Quel est le comburant ? dioxygène

4- Quel est le combustible ? Butane

5- Quels sont les réactifs ? Butane et dioxygène

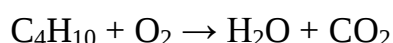
6- Quels sont les produits ? Eau et dioxyde de carbone

7- Comment on peut prouver la présence de ces produits ?

La présence de la buée explique que de l'eau s'est formée.

Le test de l'eau de chaux montre la formation de dioxyde de carbone.

8- Ecrire cette réaction bilan en utilisant les formules chimiques



### **Exercice 3**

La combustion incomplète du butane est une réaction chimique (transformation chimique) qui produit une petite quantité de la chaleur,

Butane + dioxygène → eau + dioxyde de carbone + carbone + monoxyde de carbone

1- Quelle est la couleur de la flemme (feu)

2- Comment est la quantité l'air (dioxygène)

3- Quel est le comburant ? .....

4- Quel est le combustible ? .....

5- Quels sont les réactifs ?

6- Quels sont les produits ?

7- Comment on peut prouver la présence de ces produits ?

8- Ecrire cette réaction bilan en utilisant les formules chimiques

### **Réponse**

La combustion incomplète du butane est une réaction chimique (transformation chimique) qui produit une petite quantité de la chaleur,

Butane + dioxygène → eau + dioxyde de carbone + carbone + monoxyde de carbone

- 1- Quelle est la couleur de la flamme (feu) : jaune
- 2- Comment est la quantité l'air (dioxygène) insuffisante
- 3- Quel est le comburant ? Butane
- 4- Quel est le combustible ? Dioxygène
- 5- Quels sont les réactifs ? Butane et dioxygène
- 6- Quels sont les produits ?

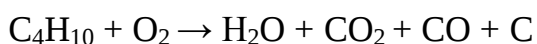
Eau et dioxyde de carbone et monoxyde de carbone et le carbone.

7- Comment on peut prouver la présence de ces produits ?

la présence de la buée explique que de l'eau s'est formée.

Le test de l'eau de chaux montre la formation de dioxyde de carbone.

8- Ecrire cette réaction bilan en utilisant les formules chimiques



### Exercice 4

La réaction de combustion du Benzène **C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>** avec l'oxygène, est



Calculer :

1- L'Enthalpie de combustion standard du benzène ( P=1atm et T=298°K)

2- L'Enthalpie de combustion standard du benzène ( P=1atm et T=400°K).

*Données :*

$$\Delta H_f^0(\text{CO}_2)_g = -393.50 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}} \quad \Delta H_f^0(\text{C}_6\text{H}_6)_l = +49.00 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}} \quad \Delta H_f^0(\text{H}_2\text{O})_l = -285.80 \frac{\text{kJ}}{\text{mole}}$$

$$\Delta H_V^0(\text{C}_6\text{H}_6) = +94.6 \frac{\text{cal}}{\text{g}} \text{ à } T_v = 80^\circ\text{C} \quad \Delta H_V^0(\text{H}_2\text{O}) = +1440 \frac{\text{cal}}{\text{g}} \text{ à } T_v = 100^\circ\text{C}$$

$$Cp(\text{C}_6\text{H}_6)_g = 81.67 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}} \quad Cp(\text{CO}_2)_g = Cp(\text{H}_2\text{O})_g = 40.00 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$Cp(\text{H}_2\text{O})_l = 75.24 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}} \quad Cp(\text{O}_2)_g = 30.00 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$Cp(\text{C}_6\text{H}_6)_l = 146.72 \frac{\text{J}}{\text{mole} \cdot ^\circ\text{K}}$$



$$\Delta H_1^0 = \int_{298^K}^{353^K} C_{P(C_6H_6)(l)} dT = C_{P(C_6H_6)(l)} \cdot \Delta T = 146,72 \cdot (353 - 298) = 8069,6 \text{ J}$$

$$\Delta H_2^0 = m \cdot \Delta H_{V(C_6H_6)}^0 = n \cdot M \cdot \Delta H_{V(C_6H_6)}^0 = 1,78 \cdot 94,64,185 = 30843,38 \text{ J}$$

$$\Delta H_3^0 = \int_{353^K}^{400^K} C_{P(C_6H_6)(g)} dT = C_{P(C_6H_6)(g)} \cdot \Delta T = 81,67 \cdot (400 - 353) = 3838,49 \text{ J}$$

$$\Delta H_4^0 = \int_{298^K}^{400^K} 7,5 \cdot C_{P(O_2)(g)} dT = 7,5 C_{P(O_2)(g)} \cdot \Delta T = 7,5 \cdot 30 \cdot (400 - 298) =$$

$$\Delta H_5^0 = \int_{298^K}^{400^K} 6 \cdot C_{P(CO_2)(g)} dT = 6 \cdot C_{P(CO_2)(g)} \cdot \Delta T = 6 \cdot 40 \cdot (400 - 298) =$$

$$\Delta H_6^0 = \int_{298^K}^{373^K} 3 \cdot C_{P(H_2O)(l)} dT = 3 \cdot C_{P(H_2O)(l)} \cdot \Delta T = 3 \cdot 75,24 \cdot (373 - 298) =$$

$$\Delta H_7^0 = m \cdot \Delta H_{V(H_2O)}^0 = n \cdot M \cdot \Delta H_{V(H_2O)}^0 = 3 \cdot 18 \cdot 1440,4 \cdot 185 =$$

$$\Delta H_8^0 = \int_{373^K}^{400^K} 3 \cdot C_{P(H_2O)(g)} dT = C_{P(H_2O)(g)} \cdot \Delta T = 3 \cdot 40 \cdot (400 - 373) =$$

D'ou:

$$\Sigma(\Delta H)_{cycle} = 0 \Rightarrow$$

D'ou:

$$\Sigma(\Delta H)_{cycle} = 0 \Rightarrow$$

$$\Delta H_1^0 + \Delta H_2^0 + \Delta H_3^0 + \Delta H_4^0 + (\Delta H_R^0)_{T=400^K} - \Delta H_5^0 - \Delta H_6^0 - \Delta H_7^0 - \Delta H_8^0 - (\Delta H_R^0)_{T=298^K} = 0$$

$$(\Delta H_R^0)_{T=400^K} = (\Delta H_R^0)_{T=298^K} + \underbrace{\Delta H_5^0 + \Delta H_6^0 + \Delta H_7^0 + \Delta H_8^0}_{\text{produits}} - \underbrace{\Delta H_1^0 + \Delta H_2^0 + \Delta H_3^0 + \Delta H_4^0}_{\text{Réactifs}} - [\Delta H_{P-R}^0]_{298^K}^{400^K}$$

On retrouve la loi de Kirchhoff

$$(\Delta H_R^0)_{T=400^K} = -3267,4 + 304,373 = -2963,027 \text{ kJ/mole}$$

$$\boxed{(\Delta H_R^0)_{T=400^K} = -2963,027 \text{ kJ/mole}}$$

### Exercice 5

Une analyse de combustion nous a donné le relevé suivant:

$$\%CO_2 = 10\%$$

$$\%O_2 = 3\%$$

Calculer le pourcentage d'excès d'air:

### Réponse

La lecture du diagramme nous donne un facteur d'air  $N = 1,14$

$$(1,14 - 1) \times 100 = 14\% \text{ d'excès d'air}$$

### Exercice 6

Une analyse de combustion nous a donné le relevé suivant:

$$\%CO_2 = 10\%$$

$$\%O_2 = 0,5\%$$

Calculer le pourcentage du défaut d'air:

### **Réponse**

La lecture du diagramme nous donne un facteur d'air  $N = 0,94$

$$(1-0,94) \times 100 = 6\% \text{ de défaut d'air}$$

## Chapitre 2. Classification des fours

---

### 1. Introduction

On parle généralement de **fours** pour les traitements de métaux et de matériaux à une température supérieure à 300 C° environ ;

le terme d'**étuve** est réservé aux traitements des produits organiques et minéraux à une température inférieure à 300 C° et, en particulier, aux traitements par la vapeur d'eau.

On peut trouver d'autres termes tels que : enceinte, chaîne, cuve, bain, réacteur, etc., mais l'étude thermique de ces équipements est semblable à celle des fours.

### 2. Définition

Un four est un outil utilisé pour élever la température d'un produit. Il peut être soit : - un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ; - un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Le four s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles :

- l'industrie sidérurgique ;
- le traitement thermique des métaux ;
- le raffinage et de l'industrie chimique ;
- la cimenterie ;
- l'industrie verrière ;
- les industries céramiques et des produits réfractaires.

**3. Le four industriel** est habituellement employé pour les applications telles que traiter, cuire ou sécher des composants, des pièces et/ou même des produits finis.

### 4. Fonctionnement

Lorsque l'opérateur ferme la porte d'accès et met en marche le four industriel, l'air à l'intérieur de celui-ci est conditionné par un réchauffeur. L'air chauffé est ensuite circulé à travers le four industriel grâce à un ventilateur qui assure la distribution égale de la température. Une fois que le four industriel atteint son point de consigne, il diminue son rendement au niveau minimal afin de maintenir une température stable. Si nécessaire, l'air chaud est expulsé via des tuyaux d'échappement afin d'initier un processus de refroidissement.

### 5. Usages des fours et étuves : Secteurs d'activité concernés et applications par secteur

#### a. Industrie des métaux

Pour ce secteur d'activité, les fours et les étuves sont présents dans :

- la sidérurgie et la première transformation de l'acier ;
- la métallurgie et la première transformation des métaux non ferreux ;
- la fonderie et le travail des métaux ;
- les constructions mécaniques, automobile, navale et aéronautique.

Chaque four a un ou plusieurs usages particuliers qui correspondent à un domaine de température (tableau 1).

#### b. Agriculture et industries agroalimentaires

Les fours et étuves de ces secteurs industriels ont pour finalité :

- le séchage dans un domaine de température d'enceinte de 40 à 180 C° ;
- la cuisson (100 à 300 C°) ;
- la pasteurisation (70 à 80 C°) ;
- la stérilisation (110 à 130 C°) ;
- la rétraction des emballages plastiques.

#### c. Matériaux et céramique

Pour ce domaine, les fours et les étuves permettent :

- le séchage de matériaux broyés : craie, talc, chaux, etc. (50 à 120 C°) ;
- le séchage de matériaux façonnés préparés par voie humide : argile, poteries, etc. ;
- la fusion de verre, de vitrocéramique, d'émaux, de réfractaires, de fibres céramique ;
- la cuisson de produits obtenus par moulage ou frittage :
  - les produits céramiques techniques (1 000 à 2 600 C°),
  - les briques, les tuiles en terre (1 000 C°),
  - les réfractaires de fours (1 200 à 1 700 C°),
  - les abrasifs de meules (1 200 C°),
  - les faïences (920 à 1 250 C°), la porcelaine (1 100 à 1 600 C°),
  - les poteries et les grès (950 à 1 280 C°) ;
- la thermomatisation du béton préfabriqué (50 à 80 C°) ;
- la fabrication du ciment (clinkérisation à 1 450 C°).

#### d. Autres secteurs

Les fours et les étuves sont également rencontrés pour :

- le séchage du bois (40 à 100 C°) ;
- le séchage de produits pharmaceutiques (20 à 80 C°) ;

- la polymérisation de matières plastiques (100 à 200 C°) ;
- la vulcanisation du caoutchouc (150 à 200 C°).

### 6. Classification

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements. Nous proposons des classifications, en fonction:

- De la manutention du produit : four continu ou discontinu
- Selon le mode de chargement
- Du procédé de chauffage : direct ou indirect.
- Du niveau de température ;
- Du combustible.

#### 6.1. Classification selon la manutention du produit :

On distingue les fours continus ou discontinus

##### A. Fours discontinus appelés aussi fours intermittents ou fours à charge :

La charge reste fixe pendant le traitement entre l'enfournement et le défournement. Un four discontinu est soumis à un cycle de température variable dans le temps, tout comme la charge. Il fonctionne en régime thermique variable : l'inertie thermique du four peut alors jouer un rôle important dans son exploitation.

Les différents **fours discontinus** sont :

- les fours à sole horizontale fixe ;
- les fours puits ;
- les fours à creuset ;
- les fours à sole élévatrice (figure 1) ;
- les fours à cloche (figure 2) ;
- les fours à pots ;
- les fours basculants ;
- les fours à sole mobile (figure 3) ;
- les fours à chariots.

##### B. Fours continus appelés fours tunnels ou fours à passage.

les produits à traiter se déplacent de façon continue ou pas à pas depuis l'enfournement jusqu'au défournement. Un four continu fonctionne en régime thermique établi. La charge traverse le four et le cycle de température est réalisé sur la longueur du four au cours de l'avancement de la charge. Chaque section du four est à température constante dans le temps, température qui lui est propre pour un cycle de traitement donné.

Les pertes globales du four sont constantes pour un cycle donné.

Les différents **fours continus** sont :

- les fours à pousseuse (fours à rails intérieurs, fours à galets intérieurs) (figure 4) ;
- les fours à traction de feuillard (figure 5) ;
- les fours à sole inclinée ;
- les fours à sole vibrante ;
- les fours à tubes-moufles ;
- les fours à chaînes ;
- les fours à câbles transporteurs ;
- les fours à tablier sans fin ;
- les fours à rouleaux commandés ;
- les fours à longerons ;
- les fours à sole tournante ;
- les fours à plateau tournant ;
- les fours à wagonnets ;
- les fours à balancelles ;
- les fours verticaux à passage pour traitement de bandes ;
- les fours à cornue rotative ;
- les fours à bains de sels à convoyeurs.

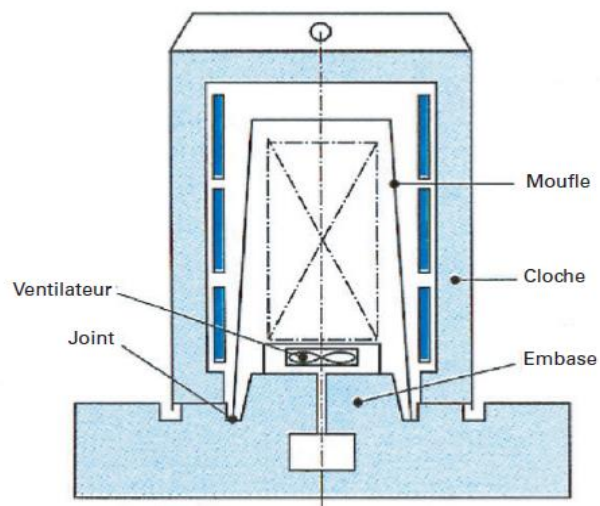


Figure 3. Four discontinu à cloche cylindrique

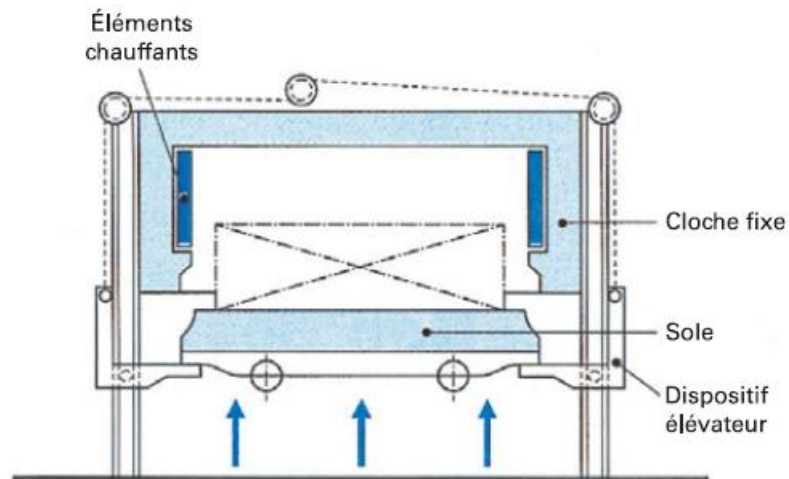


Figure 4 : Four discontinu à sole élévatrice

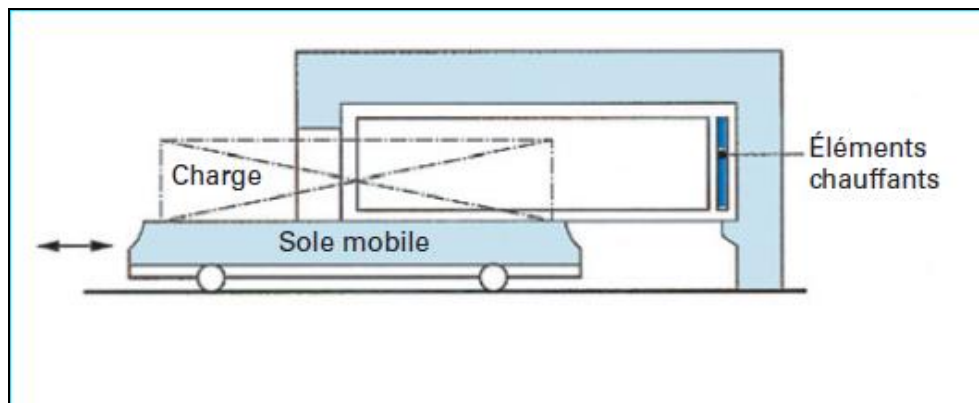


Figure 5: Four discontinu à sole mobile

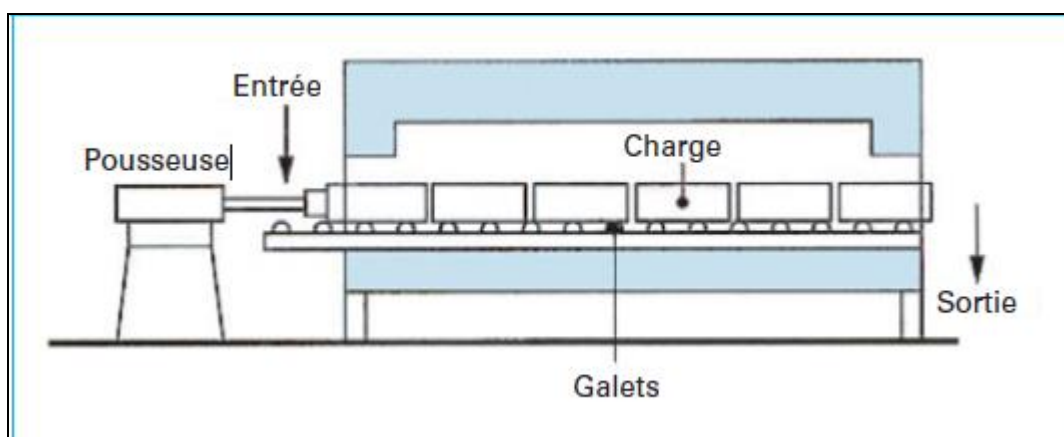


Figure 6 : Four continu à pousseuse

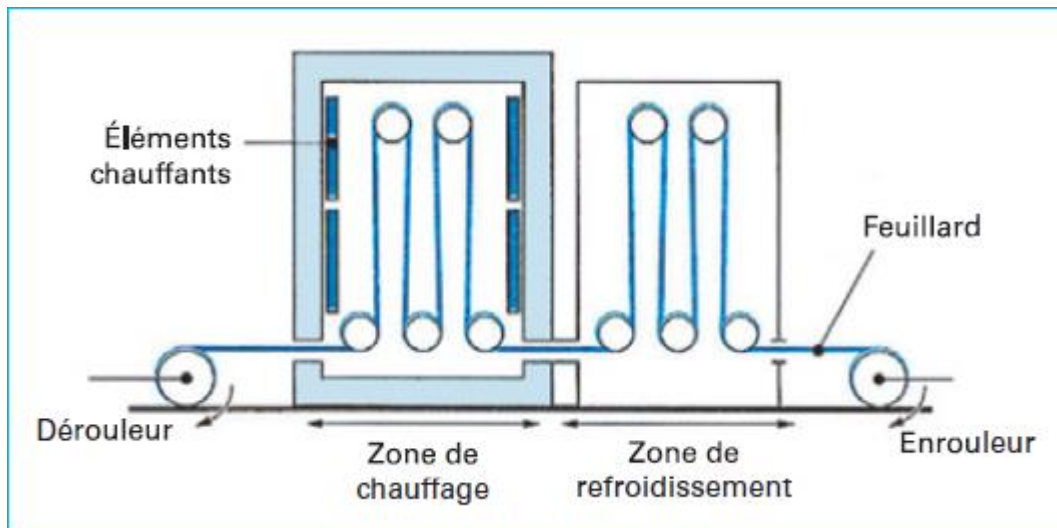


Figure 7 : Four continu à traction de feuillard

### 6.2. Classification selon le mode de chargement

Les différents modes de chargement sont les suivants.

#### ○ **Chargement horizontal**

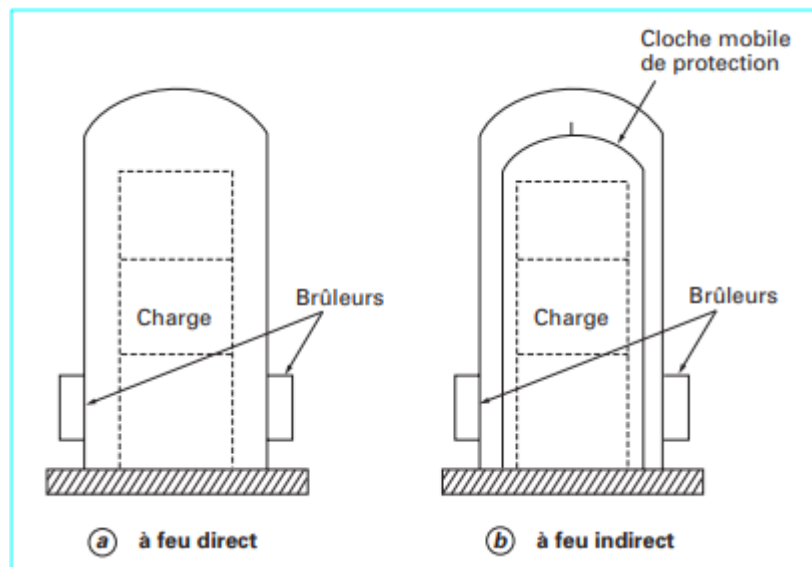
- fours à sole horizontale ;
- fours à chargeuse ;
- fours à sole mobile.

#### ○ **Chargement vertical**

- fours puits ;
- fours à cloche.

### 6.3. Fours à chauffage direct et indirect

- **Dans le chauffage direct**, il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer). Une partie du transfert de chaleur s'effectuant par convection provoque des phénomènes à la surface du produit.
- **Pour le chauffage indirect**, l'interaction entre les gaz de combustion et les parois n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui ne doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge.



**Figure 8 :** Fours à chauffage direct et indirect

### 6.4. Fours à haute et basse température

Cette classification est arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité.

#### *Exemple :*

Une température de 700°C sera considérée comme haute dans l'industrie chimique

Et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre. Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse parfois nettement, 1 200 °C.

D'un point de vue technologique, au-dessus de 700°C à 800°C, il devient délicat de construire des fours à chauffage indirect.

D'un point de vue thermique :

- au-dessus de 1000°C, le transfert de chaleur se fait essentiellement par rayonnement ;
- au-dessous de 700°C, la part de la convection devient non négligeable et on cherchera à l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit

### 6.5. Les combustibles utilisés

On peut également classer les fours en fonction de l'énergie utilisée. Le type d'énergie disponible et utilisé a en effet, un impact important sur la conception, l'utilisation et l'exploitation des fours. On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergies :

- des fours électriques : il s'agit des fours à résistance (effet de JOULE), à arcs, induction et à électrodes submergées.
- fours à gaz : ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie et le gaz à haut fourneaux.
- fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, mais aussi le gazole et le naphtha.
- fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée, mais aussi les déchets divers.

## Chapitre 3. Transfert de chaleur dans les fours

### 1. Rappels

Un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre les deux corps.

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

1. **La conduction** thermique ou diffusion thermique
2. **Le rayonnement** thermique
3. **La convection**

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques, cependant strictement parlant, seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide.

En outre il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode : le plus souvent 2 sinon 3 modes entrent en jeu.

### 2. La conduction

Est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur (ou l'échange d'énergie interne) provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux ou encore entre deux milieux en contact physique.

La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène, opaque et compact.

La conduction s'effectue de proche en proche :

Si on chauffe l'extrémité d'un solide il y a transfert progressif.

Si on coupe le solide, on stoppe le transfert.

Exemple : Barre de métal chauffée à l'une de ces extrémités.

### 3. Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un phénomène de surface, c'est un mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre plus froid sans nécessité de support matériel. C'est donc le seul mode de transfert de chaleur qui peut se propager dans le vide.

L'exemple le plus simple est celui du rayonnement solaire.

### 4. La convection

est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide gazeux ou liquide (écoulement) et échange avec une surface qui est à une température différente.

Exemple : C'est ce qui se passe le long d'un radiateur. L'air froid s'échauffe au contact avec le radiateur, se dilate et monte sous l'effet de la poussée d'Archimède. Il est alors remplacé par de l'air froid et ainsi de suite ; il ya existence de courants de fluide dans l'air ambiant.

On distinguera :

la convection forcée (due à l'action d'une pompe, ventilateur...)

la convection naturelle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles mêmes provoquées par des différences de température.

La finalité d'un four est de transférer de l'énergie à une charge (produits) pour en élever la température. Ce transfert se fera par les trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction), la plupart du temps simultanément, mais dans des proportions très variables.

### 5. Fours à haute température

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse, et parfois nettement, 1 200 °C.

C'est également le cas d'un certain nombre de fours de l'industrie du pétrole et de la chimie dans lesquels, bien que la température du produit soit inférieure à 500 °C, une partie importante de la chaleur est fournie directement par le rayonnement de la flamme dans une zone de radiation.

Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par rayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion. Les transferts de chaleur par rayonnement découlent fondamentalement de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\dot{Q} = a\sigma S (T_f^4 - T_c^4)$$

Avec  $\dot{Q}$  : puissance thermique

et de considérations géométriques liées aux dimensions et aux positions respectives des surfaces réceptrices de la chaleur (le produit à chauffer), des surfaces et volumes des émetteurs (flammes et gaz de combustion) et des surfaces réfléchissantes (parois du four).

### Loi de Stefan-Boltzmann

Cette loi indique que la valeur de la puissance thermique émise par le **rayonnement d'un corps noir** est fonction de la température absolue de ce corps, à la puissance quatrième :

$$\dot{Q}_S = \sigma T^4$$

avec  $\dot{Q}_S$  puissance émise sur l'ensemble des longueurs d'onde par unité de surface,

$T$  température du solide rayonnant (en kelvins),

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann  
( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$   
ou  $4,89 \times 10^{-8} \text{ kcal.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{K}^{-4}$ )

Dans un four, en première approximation, on considère que le four se comporte pour la charge comme un **corps noir** et la charge comme un **corps gris** vis-à-vis du four. Un *corps gris* a les mêmes caractéristiques d'émission énergétique qu'un corps noir, mais minorées par rapport à celui-ci.

On en déduit l'expression générale du transfert de chaleur par rayonnement :

$$\dot{Q} = a\sigma S (T_f^4 - T_c^4)$$

avec  $\dot{Q}$  puissance thermique transmise du four à la charge,

$T_f$  température du four,

$T_c$  température de la charge ou de la surface de la charge,

$S$  surface de la charge offerte au rayonnement du four,

$a$  coefficient d'absorption du rayonnement par la charge ; ce coefficient, qui est compris entre 0 et 1, est très proche de 1 lorsque : les dimensions du four sont grandes par rapport à celles de la charge ; la surface de la charge est peu réfléchissante

La convection jouera dans ces fours un rôle secondaire pour ce qui concerne la quantité de chaleur transférée, mais aura, dans un certain nombre de cas, un impact non négligeable sur l'égalesation des températures.

## 6. Fours à basse température

Ce sont, en particulier, les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure. C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par convection de gaz transparents. La loi fondamentale du transfert de chaleur est la loi de Newton :

$$\dot{Q} = kS (T_f - T_c)$$

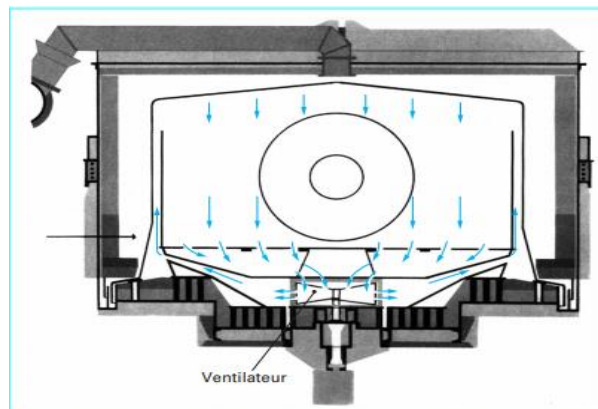
et on cherchera, pour un écart de température ( $T_f - T_c$ ) donné, à augmenter le transfert de chaleur en améliorant le coefficient de convection  $k$  qui s'écrit d'une façon générale :

$$k = A \frac{\lambda}{\ell} Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

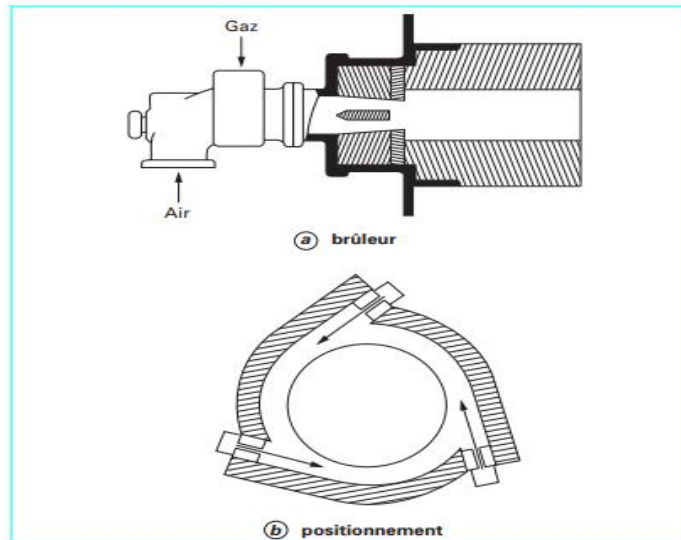
**Pr** (nombre de Prandlt) dépend essentiellement du fluide : ici les gaz de combustion. On voit qu'il faudra pour obtenir un coefficient d'échange  $k$  élevé, essayer d'augmenter la valeur de **Re** (nombre de Reynolds).

Cela se fera :

- soit par mise en vitesse du fluide : implantation de ventilateurs à l'intérieur de l'enceinte (figure 1), utilisation de brûleurs à grande vitesse d'éjection des gaz de combustion dans le foyer (figure 2), recyclage externe des gaz ;
- soit par augmentation des effets de pointe, comme l'adjonction d'ailettes ou de picots (studs) dans les zones de convection des fours tubulaires, qui accroissent simultanément la surface d'échange.



**Figure 9:** Ventilateur de circulation de gaz dans un four de réchauffage de pièces en métaux non ferreux



**Figure 10 :** Brûleur à grande vitesse et positionnement de ces brûleurs autour d'une charge cylindrique

### 7. Rôle de la conduction

Si le rayonnement et la convection sont les vecteurs principaux du transfert de chaleur du four vers la charge, avec, selon les cas, la prédominance de l'un ou de l'autre, la conduction assure le transfert de chaleur à l'intérieur des produits.

Pour les produits de grandes dimensions et/ou de faible conductivité thermique, la conduction est même assez souvent le mode déterminant dans la mesure où c'est le transfert de chaleur à l'intérieur de la charge qui limite la vitesse de chauffage et détermine le temps de séjour dans le four. Les lois à prendre en compte sont alors celles de la conduction en régime variable.

#### Exemple :

- réchauffage de lingots de forge ;
- fours de cuisson de produits réfractaires ;
- zone d'égalisation des fours de réchauffage de sidérurgie

La conduction joue aussi un rôle important pour les parois des fours, puisque c'est elle qui conditionne, en partie, les pertes thermiques du four et son rendement. Lorsque le régime de température est établi dans le four, ces pertes se calculeront par les lois de la conduction en régime permanent.

## 8. Chauffage à courants parallèles et chauffage à contre-courant

Dans les fours continus, les produits peuvent se déplacer dans le même sens que les fumées ou dans le sens inverse. L'efficacité maximale pour le transfert de chaleur est obtenue par une circulation à contre-courant. Cette disposition permet une plus grande production par unité de surface de sole ou de surface de four. Elle permet également d'obtenir une température des fumées en sortie de four plus faible, d'où un meilleur rendement énergétique global.

### Loi de Newton et coefficient de convection

Le transfert de chaleur par convection du four à la charge est gouverné par la loi de Newton :

$$\dot{Q} = k S (T_f - T_c)$$

|      |           |                                                          |
|------|-----------|----------------------------------------------------------|
| avec | $\dot{Q}$ | puissance thermique transmise,                           |
|      | $S$       | surface de la charge au contact de l'atmosphère du four, |
|      | $T_f$     | température des gaz dans le four,                        |
|      | $T_c$     | température de surface de la charge,                     |
|      | $k$       | coefficient d'échange thermique convectif                |

Le coefficient d'échange convectif  $k$  est fonction, d'une part, des conditions d'écoulement du fluide autour de la charge définies par le nombre de Reynolds  $Re$  ; d'autre part, des caractéristiques physiques du fluide groupées dans le nombre de Prandtl  $Pr$ , par la relation générale :

$$Nu = A Re^a Pr^b$$

où

$$Nu = k \ell / \lambda \quad Re = v \ell \rho / \eta$$

et

$$Pr = c_p \eta / \lambda$$

|      |           |                                                                       |
|------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| avec | $v$       | vitesse de l'écoulement,                                              |
|      | $\ell$    | dimension caractéristique du solide autour duquel s'écoule le fluide, |
|      | $\rho$    | masse volumique du fluide,                                            |
|      | $c_p$     | capacité thermique massique à pression constante, du fluide,          |
|      | $\eta$    | viscosité dynamique du fluide,                                        |
|      | $\lambda$ | coefficient de conductivité thermique du fluide                       |

Les caractéristiques physiques du fluide sont prises dans les conditions locales de température et de pression.

$Nu$ ,  $Re$  et  $Pr$  sont des nombres sans dimension, sous condition que chacun des termes qui les composent soient exprimés dans un système cohérent d'unités.

$A$ ,  $a$  et  $b$  sont des constantes qui varient selon la géométrie du système et la rugosité de la surface d'échange. On utilise souvent les valeurs suivantes :  $a = 0,80$ ,  $b = 0,33$  et  $A = 0,023$  qui découlent des études expérimentales faites sur les écoulements compris entre deux plans ou dans un tube, mais pour des calculs précis il est conseillé de se reporter à des ouvrages spécialisés traitant des phénomènes de transfert de chaleur par convection.

Par contre, cette disposition qui met les gaz les plus chauds en regard des produits à une température proche de la température finale recherchée peut, dans certains cas, générer quelques difficultés:

- surchauffe locale des produits ;
- fusion de surface des produits ;
- température de paroi trop élevée dans les fours tubulaires.

Dans ce cas on utilisera, au moins sur une partie du four, un cheminement parallèle des gaz et des produits, ce qui préservera l'intégrité de ces derniers.

### **9. Fours discontinus**

Dans les fours discontinus, la montée en température de la charge et l'égénéralisation à l'intérieur du produit, se font sans déplacement dans l'espace de ce produit.

Pendant la période de montée en température, les produits étant généralement susceptibles d'absorber une quantité de chaleur importante, le transfert de chaleur est déterminé principalement par le rayonnement.

Pendant la période d'égénéralisation, la quantité de chaleur à fournir est relativement faible et c'est la conduction dans le produit qui régit le transfert de chaleur.

Durant cette période, la convection jouera un rôle important dans l'égénéralisation des températures sur toute la surface des produits. Pour ce faire, on organisera la circulation des gaz autour des produits de telle manière que les points de la charge qui ne sont pas soumis au rayonnement, direct de la flamme ou indirect des parois, soient balayés par les fumées.

#### **Exemple :**

- sortie des fumées au niveau de la sole ;
- mise en circulation périodique des fumées par des brûleurs fonctionnant en « tout ou rien ».

### **Exercices**

#### **Exercice 1**

La paroi plane d'un four est composée de 3 couches successives de briques

- La température de la face intérieure du four est de 871 °C et la température de la face extérieure du four est maintenue à 52 °C par circulation d'air.

1) Calculer le flux perdu par unité de surface du four et déterminer les températures aux interfaces des couches.

2) Calculer le flux perdu par unité de surface du four en supposant qu'il existe une mince lame d'air de 6 mm d'épaisseur entre la couche de briques réfractaires et celle de briques isolantes. On supposera que les températures des faces internes et externes sont inchangées par rapport à la question 1). Dans ces conditions la conductivité thermique moyenne de l'air est  $\lambda_a = 0,055 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ .

| couche    | matériau                | Epaisseur (cm) | $\lambda_m (\text{Kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{°C}^{-1})$ |
|-----------|-------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| interieur | Briques réfractaires    | 20             | 1,01                                                          |
| médiane   | Briques isolantes       | 10             | 0,22                                                          |
| extérieur | Briques de construction | 15             | 0,595                                                         |

#### **réponse**

E2)1) Flux perdu par unité de surface du four :  $\phi = 905,3 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Températures intermédiaires :  $\Theta_1 = 691,7 \text{ °C}$ ,  $\Theta_2 = 280,2 \text{ °C}$

2) Flux perdu par unité de surface du four avec une couche d'air entre les deux couches de briques :  
 $\phi' = 807,8 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

#### **Exercice 2**

Afin de mesurer la température de l'air à l'intérieur d'un four, on utilise un thermocouple dont la surface est supposée grise et diffuse d'émissivité  $\epsilon = 0.6$ . l'échange convectif entre la surface du thermocouple et l'air se fait avec un coefficient  $h = 8 \text{ W/m}^2.\text{K}$ . le thermocouple indique une température  $T_m = 488 \text{ °C}$  ; alors que la température réelle de l'air « supposé transparent » est  $T_\infty = 568 \text{ °C}$  ; cet écart étant dû à l'échange radiatif du thermocouple avec les surfaces environnantes.

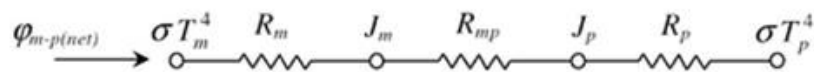
En partant d'un bilan thermique du thermocouple, déterminer la température  $T_p$  des parois du four.

## Réponse

Le bilan thermique traduisant que la chaleur transférée par convection au thermocouple se dissipe par rayonnement vers les parois du four s'écrit :

$$h (T_{\infty} - T_m) = \varphi_{m-p(net)}$$

La densité de flux radiatif net entre la surface du thermocouple et les parois du four,  $\varphi_{m-p(net)}$ , est calculée en utilisant le schéma électrique équivalent à l'échange radiatif entre deux surfaces qui forment une enceinte fermée, représenté comme suit :



$$\text{où : } R_m = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}, \quad R_{mp} = \frac{1}{F_{m-p}} = 1 \quad \text{et} \quad R_p \approx 0 \quad (\text{surface très grande assimilée}$$

à une surface noire)

$$\text{soit : } \varphi_{m-p(net)} = \frac{\sigma (T_m^4 - T_p^4)}{R_m + R_{mp} + R_p} = \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_p^4)$$

L'équation du bilan devient :  $h (T_{\infty} - T_m) = \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_p^4)$ , d'où :

$$T_p = \left( \frac{\varepsilon \sigma T_m^4 - h (T_{\infty} - T_m)}{\varepsilon \sigma} \right)^{1/4} = 462,76^\circ\text{C}$$

## Exercice 3

La paroi d'un grand four plat est composée de trois couches:

- 10 cm de briques réfractaires en kaolin à l'intérieur,
- 12.5 cm de briques isolantes en kaolin au milieu,
- et 12.5 cm de briques de magnésie à l'extérieur.

La température de la surface intérieure est  $745^\circ\text{C}$ .

Si l'air ambiant est à  $30^\circ\text{C}$  et que l'on admet un coefficient superficiel d'échange  $h=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$  à la paroi extérieure, calculer les pertes thermiques par  $\text{m}^2$  et la température de la face extérieure du four.

Reprendre ce calcul en négligeant la résistance thermique par convection au niveau de la paroi extérieure du four.

Briques réfractaires:  $\lambda=0.87 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , isolantes:  $\lambda=0.60 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ , de magnésie:  $\lambda=1 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ .

### Réponse

On utilise le modèle des résistances thermiques pour résoudre le problème.

- La résistance globale est la somme des résistances thermiques de chaque couche, soit
- $R = e_{\text{réfractaire}}/(\lambda_{\text{réfractaire}} \times S) + e_{\text{isol}}/(\lambda_{\text{isol}} \times S) + e_{\text{magnésie}}/(\lambda_{\text{magnésie}} \times S) + 1/(h_{\text{air}} \times S)$ , soit
- $R = (0.1/0.87 + 0.125/0.60 + 0.125/1 + 1/10)/S = 0.548/S$
- Le flux de pertes thermiques par unité de surface s'écrit  $\Phi = (745 - 30)/R$  d'où  
 $\Phi/S = 715/0.548 = 1305 \text{ W.m}^{-2}$ .

En négligeant la résistance par convection au niveau de la paroi extérieure, on obtient

- $R = e_{\text{réfractaire}}/(\lambda_{\text{réfractaire}} \times S) + e_{\text{isol}}/(\lambda_{\text{isol}} \times S) + e_{\text{magnésie}}/(\lambda_{\text{magnésie}} \times S)$ , soit
- $R = (0.1/0.87 + 0.125/0.60 + 0.125/1)/S = 0.448/S$
- Le flux de pertes thermiques par unité de surface s'écrit  $\Phi = (745 - 30)/R$  d'où  
 $\Phi/S = 715/0.448 = 1596 \text{ W.m}^{-2}$ .

Remarque: en calculant la température de la paroi extérieure du four, on obtient  $\Phi/S = h_{\text{air}} \times (\theta_{\text{ext}} - 30)$ , d'où  $\theta_{\text{ext}} = 30 + \Phi/(h_{\text{air}} \times S) = 30 + 1305/10 = 160^\circ\text{C}$ . A ce niveau de température, les pertes thermiques par rayonnement ne sont pas négligeables. De toutes façon, avec de telles pertes, la surface extérieure du four doit être calorifugée, à la fois pour réduire les pertes mais aussi pour la protection du personnel.

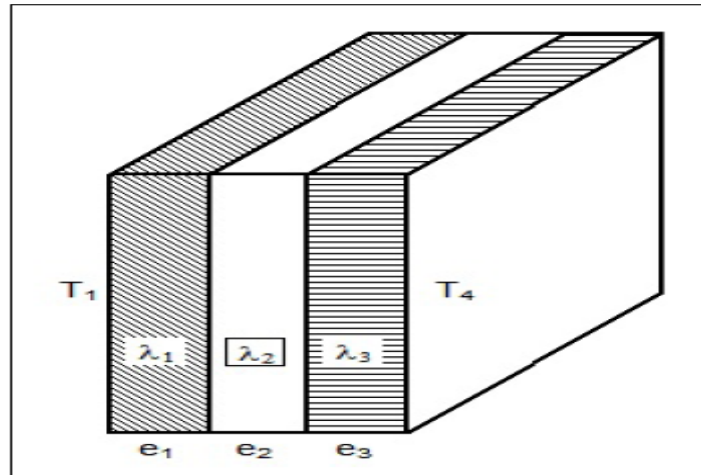
### Exercice 4

La paroi d'un four est constituée de trois matériaux isolants en série :

- Une couche intérieure de 18 cm d'épaisseur est en briques réfractaires ( $\lambda = 1,175 \text{ W/m.°C}$ );
  - Une couche de briques isolantes de 15 cm d'épaisseur ( $\lambda = 0,259 \text{ W/m.°C}$ );
  - Et une épaisseur suffisante de briques ( $\lambda = 0,693 \text{ W/m.°C}$ ).
1. Quelle épaisseur de briques doit-on utiliser pour réduire la perte de chaleur à  $721 \text{ W/m}^2$  lorsque les surfaces extérieures et intérieures sont respectivement à  $38^\circ\text{C}$  et  $820^\circ\text{C}$  ?
  2. Lors de la construction on maintient un espace libre de 0,32 cm, ( $\lambda = 0,0317 \text{ W/m.°C}$ ) entre les briques isolantes et les briques. Quelle épaisseur de briques est alors nécessaire ?

3. La température ambiante étant de 25°C, calculer le coefficient de transfert convectif  $h_c$  à l'extérieur de la paroi.

**Réponse**



$$T_1 := 820 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_4 := 38 \cdot ^\circ\text{C}$$

briques réfractaires :

$$\lambda_1 := 1.175 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$e_1 := 18 \cdot \text{cm}$$

briques isolantes :

$$\lambda_2 := 0.259 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$e_2 := 15 \cdot \text{cm}$$

briques :

$$\lambda_3 := 0.693 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

pertes maxi :

$$\phi := 721 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Conduction en régime permanent :  $\Phi$  est constant

$$\Phi = \varphi \cdot S = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S$$

On intègre pour chaque épaisseur, chaque valeur de  $\lambda$  constante

$$\int_0^{e_j} \Phi dx = - \int_{T_j}^{T_{j+1}} \lambda_j \cdot S dT$$

$$\Phi \cdot e_j = \lambda_j \cdot S \cdot (T_j - T_{j+1})$$

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{\lambda_1 \cdot S}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{e_3}{\lambda_3 \cdot S}}$$

$$\phi = \frac{\Phi}{S} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}}$$

1. Epaisseur de briques

$$e_3 := \lambda_3 \cdot \left( \frac{T_1 - T_4}{\phi} - \frac{e_1}{\lambda_1} - \frac{e_2}{\lambda_2} \right)$$

$$0.693 \cdot \left( \frac{820 - 38}{721} - \frac{.18}{1.175} - \frac{.15}{0.259} \right)$$

$$e_3 = 24.4 \text{ cm}$$

2. Couche supplémentaire :  $\lambda'_2 := 0.0317 \cdot \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

$$e'_2 := 0.32 \cdot \text{cm}$$

## Exercice 5

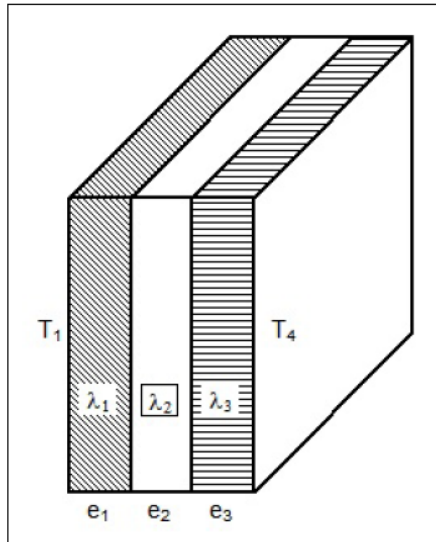
Le mur d'un four comporte trois couches de matériaux différents accolées les unes aux autres :

- Une couche de briques réfractaires ( $\lambda = 1,21 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ );
- Une couche de revêtement calorifuge ( $\lambda = 0,08 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ );
- Une couche de briques ( $\lambda = 0,69 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ ).

Chaque couche a une épaisseur de 10 cm. La température est de  $872^\circ \text{C}$  à l'intérieur du four et de  $32^\circ \text{C}$  à l'extérieur.

1. Si la surface du mur est de  $42 \text{ m}^2$ , calculer la perte calorifique par conduction pendant 24 heures.
2. Quelle est la température  $T_m$  au milieu du revêtement ?

**Réponse**



$$T_1 := 872 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_4 := 32 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_1 := 1.21 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$e_1 := 10 \cdot \text{cm}$$

$$\lambda_2 := 0.08 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$e_2 := 10 \cdot \text{cm}$$

$$\lambda_3 := 0.69 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$e_3 := 10 \cdot \text{cm}$$

$$S := 42 \cdot \text{m}^2$$

Conduction en régime permanent :  $\Phi$  est constant

$$\Phi = \varphi \cdot S = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \cdot S$$

On intègre pour chaque épaisseur, chaque valeur de  $\lambda$  constante

$$\int_0^{e_1} \Phi dx = - \int_{T_1}^{T_2} \lambda_1 \cdot S dT$$

$$\Phi \cdot e_1 = \lambda_1 \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{\lambda_1 \cdot S}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{e_3}{\lambda_3 \cdot S}}$$

$$\Phi := \frac{T_1 - T_4}{\frac{e_1}{\lambda_1 \cdot S} + \frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S} + \frac{e_3}{\lambda_3 \cdot S}}$$

Perte calorifique :

$$\Phi = \frac{872 - 32}{\frac{1}{1.21} + \frac{1}{0.08} + \frac{1}{0.69}} \cdot \frac{42}{0.10}$$

$$\Phi = 23.877 \cdot \text{kW}$$

En 24 heures :

$$\Phi \cdot 24 \cdot \text{h} = 2.063 \times 10^9 \text{ J}$$

$$\Phi \cdot 24 \cdot \text{h} = 573.0 \cdot \text{kWh}$$

## Chapitre 4. Calcul thermique des fours

### 1. Introduction

Chaque type de four a évidemment son processus de calcul propre, qui tient compte de sa technologie et de ses utilisations. On ne donnera donc que les principes de calcul communs à tous les fours.

### 2. Bilans énergétiques

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement ;
- la température finale désirée ou température de défournement;
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

Soit **Qu** cette quantité de chaleur utile.

### 3. Rendement énergétique

Le rendement d'un four est le rapport de l'énergie utile **Qu** à l'énergie **Q** qu'il faut fournir au four sous forme de combustible ou d'électricité.

En appelant **Qp** les diverses pertes thermiques, il vient :

$$Q = Q_u + Q_p$$

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} = \frac{Q - Q_p}{Q}$$

Le terme **Qp** comprend :

- les pertes par les fumées **Qf** ;
- les pertes par les parois **Qv** ;
- l'énergie nécessaire au réchauffage des parois **Qmv** ;
- les pertes par les ouvertures du four **Qe** .

Il y a lieu de déterminer ces pertes pour calculer le rendement du four.

#### 4. Rendement de combustion

Si l'on considère un combustible quelconque, il est caractérisé, entre autres, par :

- son pouvoir calorifique inférieur **PCI** ;
- le volume d'air nécessaire à sa combustion en stoechiométrie **V<sub>a0</sub>**;
- le volume de fumées produit par sa combustion en stoechiométrie **V<sub>f0</sub>** .

Dans les conditions usuelles d'utilisation dans les fours, la combustion se fait généralement avec de l'air en excès (et plus rarement avec de l'air en défaut).

Si on appelle *e* l'excès d'air exprimé en pourcentage, les volumes d'air utilisé et de fumées produites lors de la combustion complète d'une unité de masse (pour les solides et les liquides) ou de volume (pour les gaz) de combustible s'écrivent :

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} (1 + e/100) \\ V_f &= V_{f0} + (V_{a0} \times e/100) \end{aligned}$$

Les pertes par les fumées '*Q<sub>f</sub>*' s'écrivent :

$$Q_f = V_f C_{pf} T_f$$

Avec

*T<sub>f</sub>* température de sortie de fumées du four (en °C),

*C<sub>pf</sub>* capacité thermique volumique moyenne à pression constante dans l'intervalle de température 0 °C à *T<sub>f</sub>*

La chaleur apportée par l'air s'écrit :

$$Q_a = V_a C_{pa} T_a$$

*T<sub>a</sub>* température de l'air à son entrée dans le four (en °C) ,

*C<sub>pa</sub>* capacité thermique volumique à pression constante de l'air

On appelle rendement de combustion, le rapport :

$$\eta_c = \frac{PCI + Q_a - Q_f}{PCI} \quad (2)$$

Le rendement de combustion ne dépend que du combustible, des conditions d'excès d'air dans lequel il est brûlé et de la température des fluides entrant et sortant du four. Il ne dépend pas du type de four, ni de sa technologie.

Si on considère le four et l'équipement éventuel de préchauffage de l'air à partir des fumées comme un seul système, et en considérant, dans ce cas, la température des fumées  $T_f$  à l'aval du réchauffeur d'air, la relation (2) devient :

$$\eta_c = \frac{PCI - Q_f}{PCI} \quad (3)$$

Relation entre le rendement énergétique et le rendement de combustion

Ramené à une unité de combustible, la relation (1) peut s'écrire :

$$\eta = \frac{PCI - Q_p}{PCI}$$

ou 
$$\eta = \frac{PCI - Q_f - (Q_v + Q_{mv} + Q_e)}{PCI}$$

et en introduisant  $\eta_c$  donné par la relation (3) :

$$\eta = \eta_c - \frac{(Q_v + Q_{mv} + Q_e)}{PCI} \quad (4)$$

Dans un certain nombre d'installations, par exemple pour les **fours continus à basse température**, le terme :

$$\frac{(Q_v + Q_{mv} + Q_e)}{PCI}$$

est petit et, dans ce cas, il vient :

$$\eta \approx \eta_c$$

- **Rendement des fours continus**

Dans un four continu en régime thermiquement stabilisé, les températures des fumées et de l'air de combustion sont constantes dans le temps et les parois sont en équilibre thermique, ce qui entraîne :

$$Q_{mv} = 0$$

Les fours continus étant assez peu souvent arrêtés et refroidis, l'énergie utilisée durant les périodes de mise en température est souvent négligeable dans le bilan global d'exploitation.

- **Rendement des fours discontinus**

Dans un four discontinu, la température des fumées et, pour les fours équipés de réchauffeurs d'air par récupération sur les fumées, celle de l'air de combustion sont variables au cours du cycle. Le calcul se fait donc sur la base de la totalité du cycle.

On détermine au préalable, la température moyenne des fumées  $T_{fm}$  au cours du cycle de durée  $t$  :

$$T_{fm} = \frac{1}{t} \int_0^t T_f(t) dt$$

On évalue éventuellement, la température moyenne de l'air de combustion  $T_{am}$  :

$$T_{am} = \frac{1}{t} \int_0^t T_a(t) dt$$

On calcule ensuite les termes  $Q_v$  et  $Q_{mv}$ , ce qui nécessite la connaissance des caractéristiques physiques des parois réfractaires et isolantes.

Enfin, on tient compte de l'évolution des pertes par les ouvertures  $Q_e$ , en fonction des variations de la température du four au cours du cycle.

On obtient le rendement  $\eta$  de l'opération en introduisant ces valeurs dans la relation (3).

- **Détermination des pertes par les parois 'Qv'**

Dans les fours continus, en régime thermique établi, on applique pour les parois planes (murs, voûte, sole) la relation :

$$\dot{Q}_v = K (T_i - T_e) S$$

avec 
$$K = \frac{1}{(\sum e_i / \lambda_i) + (1/k_e)}$$

$e_i$  épaisseur des  $i$  couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

$\lambda_i$  conductivité thermique des  $i$  couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

$k_e$  coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance ;

$T_i$  température de la paroi interne du four ;

$T_e$  température externe ambiante ;

$S$  surface externe du four.

Dans les fours convenablement isolés,  $T_i$  est très proche de la température de l'ambiance du four à l'endroit considéré. Le coefficient  $k_e$  regroupe :

— un facteur rayonnement qui croît avec la température de la paroi externe  $T_e$  ;

— un facteur convection qui croît avec la vitesse de circulation de l'air autour de la paroi externe.

Pour les fours qui supportent d'être portés à leur température normale d'utilisation sans être chargés, une approche, « des pertes » par les parois peut être obtenue en mesurant la puissance thermique  $\dot{Q}_{\min}$  fournie durant cette période, le four étant stabilisé thermiquement, sous forme de combustible. On obtient alors :

$$\dot{Q}_{vv} = \dot{Q}_{\min} \eta_c$$

Les pertes à vide ' $\dot{Q}_{vv}$ ' peuvent être légèrement supérieures aux pertes par les parois  $\dot{Q}_v$  dans la mesure où, sans charge, la distribution des températures dans l'enceinte du four peut être différente de la distribution des températures avec charge.

Pour les fours discontinus,  $T_i$  varie avec le temps, il en est de même de l'évolution des températures dans les parois. Il faudra donc faire le calcul, pour un cycle, par tranche de temps. Ce calcul nécessite donc de résoudre préalablement un problème de conduction en régime variable dans un mur composite.

- **Calcul de la chaleur accumulée**

Le calcul de l'énergie nécessaire au réchauffage des parois ' $\dot{Q}_{mv}$ ' demande la connaissance de la distribution de température dans les parois lorsque l'équilibre thermique est atteint, ainsi que celle des caractéristiques physiques, à la température considérée, des matériaux composants ces parois. Pour chacun des composants des parois, on a :

$$Q_{mvi} = M_i C_i (T_{fin} - T_{in})$$

|      |           |                                                    |
|------|-----------|----------------------------------------------------|
| avec | $M_i$     | masse du matériau considéré,                       |
|      | $c_i$     | capacité thermique massique du matériau considéré, |
|      | $T_{in}$  | température initiale du matériau,                  |
|      | $T_{fin}$ | température finale du matériau                     |

$C_i$  étant le plus souvent fonction de la température, on prendra la valeur moyenne entre  $T_{in}$  et  $T_{fin}$ .

Les températures  $T_{in}$  et  $T_{fin}$  variant dans l'épaisseur de la paroi, on prendra les valeurs moyennes entre les deux faces de la paroi.

Pour les fours continus, l'importance de  $\dot{Q}_{mv}$  dans le bilan global de l'installation est relativement faible. Cela n'est plus le cas pour les fours discontinus, pour lesquels la capacité thermique des parois joue un rôle important.

### • Rendement en exploitation

Les rendements précédents sont des rendements instantanés sur une période de temps limitée. Ils sont utilisés pour déterminer les performances d'une installation dans des conditions bien définies.

En exploitation industrielle les conditions d'exploitation sont variables :

- le four n'est pas utilisé en permanence à sa production maximale ;
- certaines installations fonctionnent d'une façon discontinue.

Cela entraîne une consommation énergétique qui peut être sensiblement supérieure à celle obtenue lors d'un essai limité dans le temps. On utilise alors la notion de **consommation spécifique**  $C_s$  qui est le rapport de l'énergie totale utilisée pendant une période donnée (par exemple un mois) à la quantité de produit chauffé ou traité durant la même période :

$$C_s = \frac{\text{énergie contenue dans le combustible}}{\text{masse de produits chauffés}}$$

### 5. Flux thermiques admissibles

Le flux thermique admissible est la quantité de chaleur que l'on peut fournir à la charge par unité de temps et de surface. On l'exprime en **kW/m<sup>2</sup>** ou encore parfois en **kcal.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>**.

Dans un four continu, le flux reçu par le produit varie en fonction de la position de celui-ci dans le four.

Dans un four discontinu, le flux reçu varie au cours du temps. Très souvent ce flux est limité par les capacités d'absorption de la charge.

Un flux trop élevé peut entraîner :

- des contraintes thermiques inacceptables dans les pièces de grandes dimensions (fours de forge) ou de faible conductivité thermique (four de cuisson de céramique) ;
- une température de surface entraînant une fusion locale du produit (fours de réchauffage avant laminage) ;
- une température trop élevée de l'écran de protection intermédiaire (four à cloches mobiles)
- une température entraînant localement une dissociation du produit chauffé (four tubulaire de la chimie).

**Remarque :** La maîtrise des flux thermiques est un des points les plus importants dans la définition et la conduite des fours. Elle impose de savoir maîtriser et d'adapter à chaque four, les phénomènes de combustion et de transfert de chaleur.

### 6. Qualité du chauffage

Sauf dans des cas très particuliers où l'on cherche à obtenir des différences de températures entre les différents points d'un produit (par exemple : surchauffe des rives d'une bande métallique avant soudure, traitement de surface de pièces mécaniques), on recherche généralement à obtenir, à la sortie du four, un produit à une température la plus homogène possible.

Cela n'est pas toujours facile du fait des dissymétries qui existent inévitablement dans l'enceinte des fours :

- produits ou partie de produits inégalement exposés au rayonnement des flammes (fours de réchauffage de lingots) ;
- produits inégalement irrigués par les gaz en circulation (four de traitement thermique à basse température) ;
- contacts des produits avec des supports refroidis (four à longerons mobiles) ;
- déséquilibre entre plusieurs passes d'un même four (four de raffinage de pétrole).

Cette homogénéité de température est obtenue, ou au moins approchée, par :

- une zone dite d'égalisation, dans les fours continus ;
- un séjour à température constante en fin de cycle, dans les fours discontinus.

Dans les deux cas, les flux thermiques transmis du four à la charge deviennent faibles ou nuls, et c'est par conduction que se fait l'égalisation des températures.

La durée de cette période d'égalisation sera fonction :

- des écarts de température apparus au cours de la montée en température ;
- des dimensions transversales du (ou des) produits ;
- de la conductivité thermique du produit.

La qualité du chauffage sera donnée par l'écart de température maximal entre deux points d'un même produit et/ou entre deux produits successifs.

**Exemple :** écarts de température :

- sur la largeur d'une bande d'acier ;
- entre le haut et le bas d'un lingot ;

### 7. Puissance installée

C'est la quantité de chaleur maximale que l'on peut introduire par unité de temps dans le four.

Fours continus : La puissance installée sur l'ensemble du four est donnée par :

$$P = \dot{Q}_u / \eta = (\dot{Q}_u + \dot{Q}_v + \dot{Q}_e) / \eta_c$$

avec  $\eta_c$  et  $\eta$  respectivement rendement de combustion et rendement du four

Dans les fours continus à plusieurs zones de chauffage, cette puissance devra être répartie entre les différentes zones. Chacune des zones devra donc être calculée comme indiqué ci-dessus mais avec, pour certaines des zones, un apport de chaleur complémentaire, celui des fumées entrant dans la zone considérée en provenance de la (ou des) zone(s) se trouvant en amont sur l'écoulement des fumées (figure).

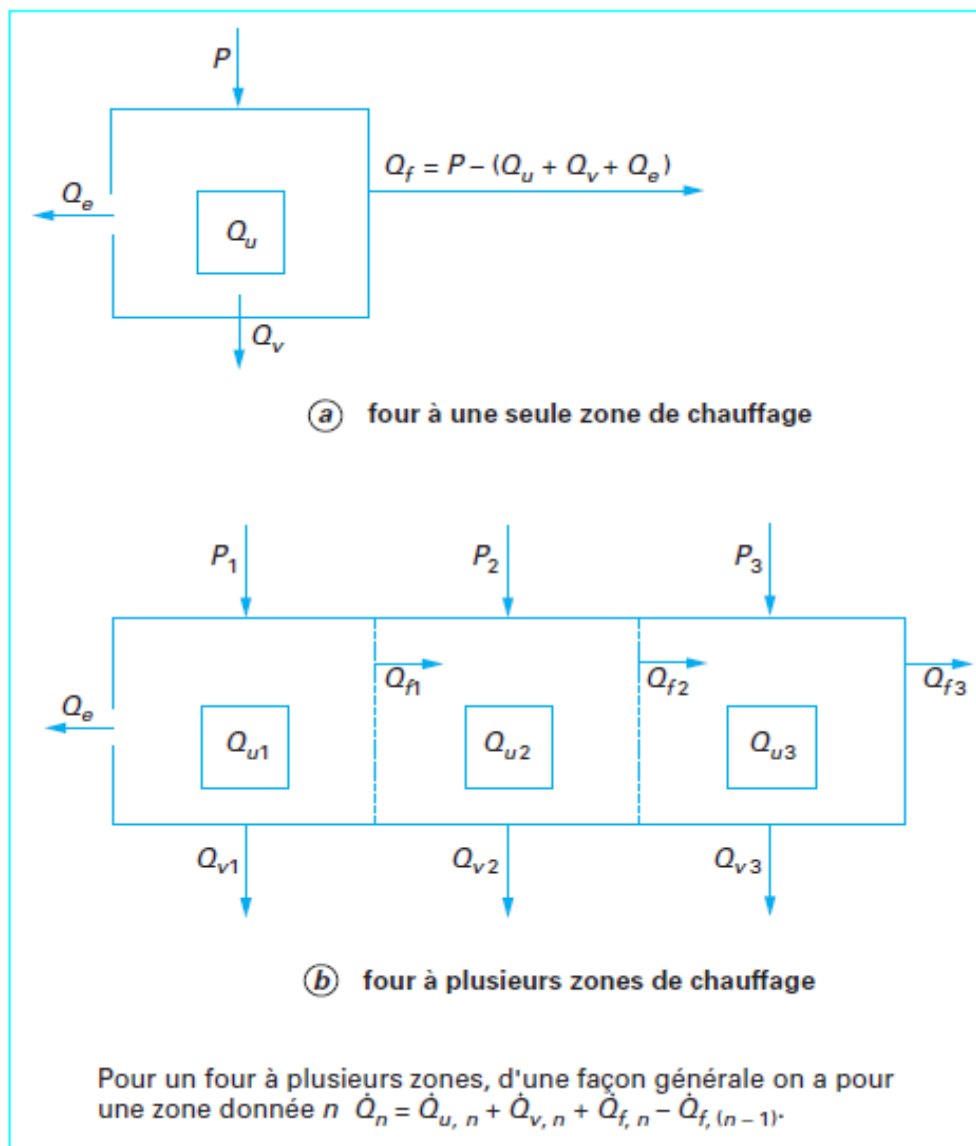


Figure 11 : Puissance installée

Fours discontinus : La quantité de chaleur totale à fournir au cours du cycle de durée  $t$  est donnée par :

$$Q_{\text{totale}} = \int_0^t (Q_u + Q_f + Q_v + Q_{mv} + Q_e) dt$$

L'énergie qu'il faudra fournir au four sur l'ensemble du cycle est :

$$E = Q_{\text{totale}} / \eta$$

La durée du cycle  $t$  étant connue par ailleurs, on en déduit la puissance moyenne :

$$P_{\text{moy}} = E / t$$

La détermination de la puissance installée est un peu plus délicate, car on peut imaginer plusieurs cycles ayant la même  $P_{\text{moy}}$ .

### 8. Dimensionnement des fours

C'est le problème principal pour le concepteur et le constructeur. Les calculs de dimensionnement sont, évidemment, spécifiques à chaque type de four. Fondamentalement, ces calculs consistent à résoudre simultanément tout ou partie des relations suivantes.

La loi de Stefan-Boltzman qui régit les échanges par rayonnement entre le four et la charge

$$Q_r = \int a \sigma S (T_f^4 - T_c^4) dt$$

La loi de Newton qui régit les échanges par convection entre le four et la charge :

$$Q_c = \int k S (T_f - T_c) dt$$

L'équation de Fourier qui régit les échanges par conduction à l'intérieur des produits :

$$\partial T / \partial t = \lambda / c_p \rho (\nabla T).$$

:

Ils se font actuellement avec des programmes informatiques de calcul, par des méthodes numériques plus ou moins sophistiqués, et des simplifications adaptées à chaque type de four, qui intègrent les données rappelées ci-dessous :

- flux thermiques acceptables ;
- temps de séjour nécessaire à l'égalisation des températures ;
- chaleur utile ;
- rendement de combustion ;
- pertes diverses ; etc.

On détermine de cette façon le temps de séjour du produit dans le four et, en fonction de la production souhaitée, les dimensions du four.

Exercices

Exercice 1

Dans un four, le débit de fluide froid est  $12 \text{ t.h}^{-1}$ , la température passe de  $20$  à  $145^\circ\text{C}$ , et l'oxygène dans les fumées est  $2.5\%$ . Lorsque le four est en régime stationnaire, calculer:

- le flux d'énergie dégagée par la combustion du méthane, dont le débit du méthane est  $142\text{kg/h}$
- le flux capté par le fluide froid,
- le flux emporté par les fumées
- le rendement obtenu.

**Données:**  $M_{\text{CH}_4}=16 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{O}_2}=32 \text{ g.mol}^{-1}$ ,  $M_{\text{N}_2}=28 \text{ g.mol}^{-1}$ , air à  $21\%$  d' $\text{O}_2$  et  $79\%$  d' $\text{N}_2$  en volume (ou en moles), enthalpie de la réaction de combustion complète du méthane  $\Delta H_{\text{CH}_4}=-801.5 \text{ kJ.mol}^{-1}$ .

Masse molaire moyenne de l'air: pour 100 moles d'air, on a 21 moles d' $\text{O}_2$  soit  $21 \times 32 \text{ g}$  d' $\text{O}_2$  et 79 moles d' $\text{N}_2$  soit  $79 \times 28 \text{ g}$  d' $\text{N}_2$ . La masse molaire moyenne de l'air est donc  $M_{\text{air}}=(21 \times 32 + 79 \times 28)/100=28.84 \text{ g.mol}^{-1}$ .

Réponse

L'équation de combustion complète s'écrit  $\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$ .

- Pour le débit de méthane obtenu  $142.0 \text{ kg.h}^{-1}$ , l'énergie dégagée par la combustion est  $\Phi_1=142.0 \times 801.5/16 \times 10^{-3}=7.113 \times 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$ , soit en divisant par 3600  $1975.9 \text{ kW}$ .
- Le flux capté par le fluide froid qui passe de  $20$  à  $145^\circ\text{C}$  est  $\Phi_2=12000 \times 4.18 \times (145-20)=6.270 \times 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$ , soit en divisant par 3600  $1741.7 \text{ kW}$ .
- L'énergie emportée par les fumées est  $\Phi_3=\Phi_1-\Phi_2=0.843 \times 10^6 \text{ kJ.h}^{-1}$ , soit  $234.2 \text{ kW}$ .
- Le rendement (par rapport au PCI) s'écrit énergie utile / énergie fournie  $=1741.7/1975.9=88.2\%$ .

L'énergie emportée par les fumées peut être calculée par le débit fois le  $C_p$  moyen des fumées fois la  $\Delta T$  sur les fumées entre l'entrée au brûleur et la sortie à la cheminée. Les fumées sortent à  $272.6^\circ\text{C}$ . Le  $C_p$  moyen des fumées entre  $20^\circ\text{C}$  et  $272.6^\circ\text{C}$  est donné dans le rapport de combustion à  $31.35 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Reste donc à calculer le débit molaire des fumées. Comme le nombre de moles de part et d'autre de l'équation de réaction est identique, il suffit de calculer le débit molaire entrant dans le four.

- Pour le méthane, on a  $142.0/16 \times 10^{-3}=8875.0 \text{ mol.h}^{-1}$ .
- Pour l'air on a  $2801 \text{ kg.h}^{-1}$ , d'où  $2801/28.84 \times 10^{-3}=97122.1 \text{ mol.h}^{-1}$ .
- Le débit molaire global est donc  $97122.1+8875.0=105997.1 \text{ mol.h}^{-1}$ .

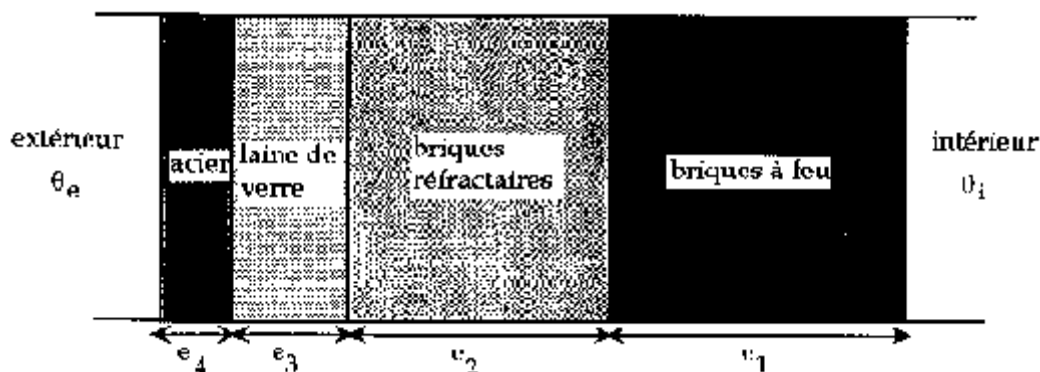
- Le flux emporté par les fumées s'écrit donc  $\Phi'_3 = 105997.1 \times 31.35 \times (272.6 - 20) / 1000 = 0.839.e6 \text{ kJ.h}^{-1}$ , soit 233 kW.

L'énergie emportée par les fumées peut être calculée par le débit fois le  $C_p$  moyen des fumées fois la  $\Delta T$  sur les fumées entre l'entrée au brûleur et la sortie à la cheminée. Les fumées sortent à 272.6°C. Le  $C_p$  moyen des fumées entre 20°C et 272.6°C est donné dans le rapport de combustion à 31.35 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Reste donc à calculer le débit molaire des fumées. Comme le nombre de moles de part et d'autre de l'équation de réaction est identique, il suffit de calculer le débit molaire entrant dans le four.

- Pour le méthane, on a 142.0/16.e-3=8875.0 mol.h<sup>-1</sup>.
- Pour l'air on a 2801 kg.h<sup>-1</sup>, d'ou 2801/28.84.e-3=97122.1 mol.h<sup>-1</sup>.
- Le débit molaire global est donc 97122.1+8875.0=105997.1 mol.h<sup>-1</sup>.
- Le flux emporté par les fumées s'écrit donc  $\Phi'_3 = 105997.1 \times 31.35 \times (272.6 - 20) / 1000 = 0.839.e6 \text{ kJ.h}^{-1}$ , soit 233 kW.

### Exercice 2

La paroi d'un four électrique industriel est constituée de plusieurs matériaux comme l'indique le schéma ci-dessous.



Données numériques.

Température ambiante intérieure :  $\theta_i = 1092 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Température ambiante extérieure :  $\theta_e = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Surface intérieure du four :  $S = 8,00 \text{ m}^2$ .

Résistance superficielle interne pour un mètre carré de paroi :  $1/h_i = r_i = 0,036 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ .

Résistance superficielle externe pour un mètre carré de paroi :  $1/h_e = r_e = 0,175 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ .

Caractéristiques des divers matériaux :

| Matériau           | Épaisseur              | Conductivité thermique                            |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------------------|
| Brique à feu       | $e_1 = 230 \text{ mm}$ | $\lambda_1 = 1,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| Brique réfractaire | $e_2 = 150 \text{ mm}$ | $\lambda_2 = 0,70 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| Laine de verre     | $e_3 = 50 \text{ mm}$  | $\lambda_3 = 0,07 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| Acier              | $e_4 = 3 \text{ mm}$   | $\lambda_4 = 45 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$   |

1. Exprimer littéralement puis calculer la résistance thermique globale R de un mètre carré de paroi.
2. Exprimer littéralement puis calculer la densité de flux thermique  $\phi$  (puissance thermique par unité de surface) traversant la paroi.
3. Déterminer les températures au niveau des diverses interfaces de l'intérieur vers l'extérieur  $\theta_{si}$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ,  $\theta_{se}$ .
4. En admettant que la transmission de la chaleur est uniforme sur l'ensemble des parois du four, calculer la puissance électrique p nécessaire à son fonctionnement à vide.

## Réponse

1)  $R = R_a + R_{lv} + R_{br} + R_{bf} + 1/h_i + 1/h_e$

$R_T = 1,36 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$

2)  $\phi = (\theta_i - \theta_e)/R$

$\phi = 779 \text{ W.m}^{-2}$

3)  $\phi = h_i(\theta_i - \theta_{si})$   $\theta_{si} = \theta_i - \phi/h_i = 1064 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = \lambda_1(\theta_{si} - \theta_1)/e_1$   $\theta_1 = \theta_{si} - \phi.e_1/\lambda_1 = 892 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = \lambda_2(\theta_1 - \theta_2)/e_2$   $\theta_2 = \theta_1 - \phi.e_2/\lambda_2 = 725 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = \lambda_3(\theta_2 - \theta_3)/e_3$   $\theta_3 = \theta_2 - \phi.e_3/\lambda_3 = 169 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = h_e(\theta_{se} - \theta_e)$   $\theta_{se} = \theta_e + \phi/h_e = 168 \text{ }^\circ\text{C}$

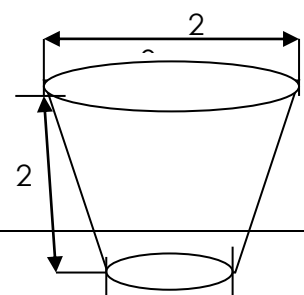
4) Puissance =  $\Phi = \phi.S = 6,23 \text{ kW}$

## Exercice 3

Un four partiellement conique est ouvert par le haut à l'ambiance de température  $27^\circ\text{C}$ . Les surfaces latérale (B) et du fond (R) (supposées comme des corps noirs) sont chauffées électriquement et maintenues à des températures de  $100^\circ\text{C}$  et  $1200^\circ\text{C}$ , respectivement.

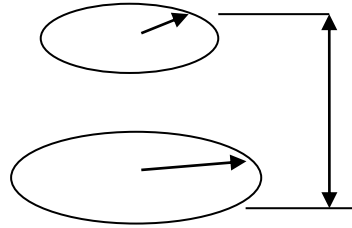
Calculer le flux de chaleur radiale perdu par (R).

$$R_1 = \frac{r_1}{a} \quad R_2 = \frac{r_2}{a}$$



$$X = 1 + \frac{1+R_2^2}{R_1^2}$$

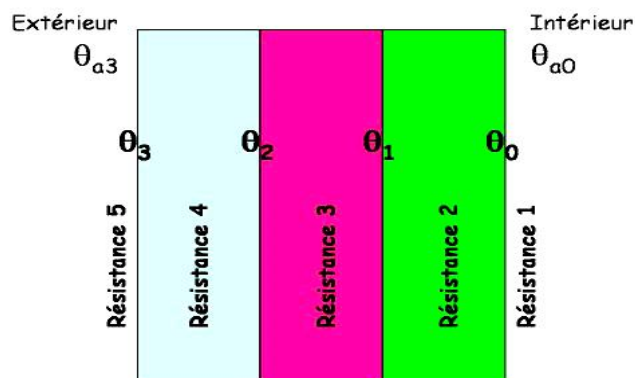
$$F_{1-2} = \frac{1}{2} \left[ X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{R_2^2}{R_1^2} \right)} \right]$$



#### Exercice 4

Considérons un mur composite (voir la figure ci-dessous) et les différentes résistances au transfert suivantes : 1. Convection interne air - paroi, 2. conduction dans la première couche, 3. conduction dans la deuxième couche, 4. conduction dans la troisième couche, 5. Convection externe air – paroi.

Si la température ambiante interne,  $\theta_{a0}$ , et la température  $\theta_2$  de l'interface entre la deuxième couche et la troisième couche sont connues, les résistances à prendre en compte pour calculer le flux de chaleur sont :



les résistances 2 + 3 + 4

les résistances 1 + 2 + 3

les résistances 4 + 5

la résistance 3

les résistances 2 + 3

la résistance 4

Justifier votre réponse

#### Réponse

les résistances 1 + 2 + 3

les résistances 1 + 2 + 3 car il ne faut écrire que les résistance comprises entre ces deux températures.

### Exercice 5

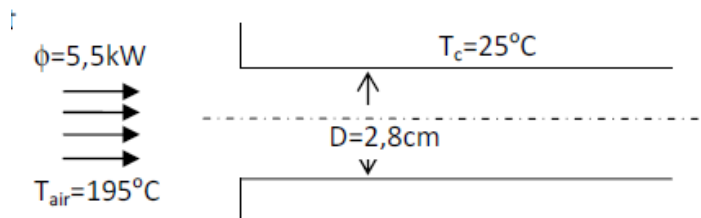
Dans un cylindre de 2,8cm de diamètre et de 3m de long circule de l'air à la température de 195°C, le cylindre reçoit un flux de chaleur égale à 5500W maintenu à la température de 25°C,

- Déterminer le coefficient de l'échange de chaleur.
- Dédire le nombre de Nusselt de l'écoulement sachant que  $K = 0,026 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
- Calculer le nombre de Reynolds de l'écoulement en admettant que :

Le nombre de Prandtl est égal à 0,73

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k}, \quad Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

### Réponse



- Le coefficient de l'échange de chaleur par convection (h):

$$\phi = h \cdot S \cdot (T_f - T_p) \Leftrightarrow h = \frac{\phi}{S \cdot (T_f - T_p)}; S = \pi \cdot D \cdot L$$

$$h = \frac{\phi}{S \cdot (T_f - T_p)} = \frac{5500 \text{ W}}{\pi \cdot 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 3 \text{ m} \cdot (195 - 25)^\circ\text{C}} = 122,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

- Le nombre de Nusselt (Nu):

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = \frac{122,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{0,026 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}} = 132,03$$

Le nombre de Reynolds (Re):

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \Leftrightarrow Re = \sqrt[0,8]{\frac{Nu}{0,023 \cdot Pr^{0,4}}}$$

$$Re = \sqrt[0,8]{\frac{Nu}{0,023 \cdot Pr^{0,4}}} = \sqrt[0,8]{\frac{132,03}{0,023 \cdot (0,73)^{0,4}}} = 58481,64$$

## Chapitre 5. Isolation des fours

---

### 1. Conception générale

Les fours modernes comportent tous une enveloppe métallique généralement fortement fabriquée pour reprendre le poids de la voûte, les poussées des parois réfractaires et les efforts engendrés par les dilatations des éléments constitutifs.

À l'intérieur de cette enveloppe, on dispose plusieurs couches de matériaux isolants et réfractaires qui ont pour but :

- de limiter les déperditions thermiques ;
- de protéger l'espace environnant et le personnel d'exploitation.

### 2. Définitions

On distingue dans la construction réfractaire d'un four les éléments suivants.

- **La sole** : C'est un plan horizontal ou parfois incliné sur lequel reposent généralement les produits. La sole peut être fixe ou mobile (four à chariot, four à sole mobile) ; elle peut être directement au contact des produits solides (four tournant de forge) ou de produits liquides (four de fusion du verre).
- **La voûte** : Elle peut avoir des formes diverses : plate, cintrée, avec des rampants, suspendue. La voûte est en contact avec les gaz de combustion et, assez souvent, directement avec la flamme. Elle joue un rôle important dans le transfert de chaleur en renvoyant, par rayonnement sur les produits, l'énergie qu'elle reçoit de la flamme.
- **Les murs verticaux ou piédroits** : Ils font la liaison entre la voûte et la sole. Ils doivent reprendre le poids de la première et contenir les poussées de la seconde. Dans les fours où la charge est liquide, ils doivent également reprendre directement la poussée due à cette charge.

### 3. Physique des matériaux réfractaires

Les matériaux réfractaires dont on dispose sont de trois types :

- les matériaux préculés ;
- les matériaux non préformés ;
- les matériaux fibreux.

- **Matériaux précuits**

Ils se présentent sous forme de pièces standards (briques, copeaux) ou de pièces de forme spéciale (ouvrages de brûleurs). Ils sont cuits à haute température et sont, de ce fait, parfaitement stabilisés. Leur composition chimique dépend du niveau de réfractérité que l'on veut atteindre. Leurs dimensions augmentent légèrement au cours de la montée en température du four, d'où la nécessité de prévoir des joints de dilatation lors de la construction.

- **Matériaux non préformés**

Ils sont mis à la disposition de l'utilisateur en vrac. Mélangé sur le chantier avec un liant et parfois un agrégat complémentaire, leur mise en forme et leur cuisson se fait sur place. On distingue :

- les bétons à liant hydraulique ;
- les plastiques à liant chimique.

Portés à leur température d'utilisation, ces produits subissent une céramisation qui vient relayer ou conforter les liaisons hydrauliques existantes lors de leur mise en place. Cette céramisation, se fait souvent avec un retrait dimensionnel dont il faut tenir compte lors de la conception et de la construction.

- **Matériaux fibreux**

Ils sont composés de fibres de quelques centimètres de longueur et de quelques micromètres de diamètre mises sous forme de nappes, ou parfois sous forme de pièces de géométrie particulière. Les matériaux fibreux ont une densité apparente nettement plus faible que celle des produits précédents. Ils permettent donc de diminuer considérablement l'inertie thermique de la construction et sont, de ce fait, particulièrement bien adaptés pour les fours à fonctionnement discontinu ou cyclique. Ils permettent également grâce à leur très faible densité de diminuer considérablement le poids des voûtes et les efforts sur les pénétrations.

#### 4. Chimie des matériaux réfractaires

Quelle que soit la forme physique sous laquelle se présente le matériau réfractaire, sa tenue à la température dépend principalement de sa composition chimique.

Les matériaux réfractaires les plus usuels sont obtenus à partir d'argiles silico-alumineuses et leur résistance à la température est fonction de leur teneur en alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), comme on peut le voir sur le tableau qui donne la résistance pyroscopique (essai de laboratoire normalisé) en fonction de la teneur en ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ ) du matériau.

**Tableau 2.** Résistance pyroscopique des matériaux réfractaires silico-alumineux en fonction de leur teneur en alumine

| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiO <sub>2</sub> %                                                             | Résistance pyroscopique °C |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ≤ 20                                                                                                            | 1520                       |
| 20/25                                                                                                           | 1580                       |
| 25/30                                                                                                           | 1650                       |
| 30/35                                                                                                           | 1670                       |
| 35/40                                                                                                           | 1690                       |
| 40/42                                                                                                           | 1710                       |
| 42/45                                                                                                           | 1730                       |
| (1) L'oxyde de titane, dont la teneur est généralement faible inférieure à 2%, est comptabilisé avec l'alumine. |                            |

En dehors des réfractaires silico-alumineux, on utilise pour certaines applications particulières des matériaux réfractaires à base de silice (SiO<sub>2</sub>) presque pure, de magnésie (MgO) ou encore de zircone (ZrO<sub>2</sub>).

On retiendra que les performances d'un réfractaire donné sont fortement dépendantes de sa teneur en impuretés. Parmi celles-ci, les oxydes de sodium (Na<sub>2</sub>O) et de potassium (K<sub>2</sub>O) et, à un moindre degré, les oxydes de fer (FeO) jouent un rôle essentiel, car leur présence diminue considérablement la température maximale d'utilisation. On les désigne habituellement sous le terme de fondants.

### 5. Interactions entre les réfractaires et le four

Les réfractaires ne sont pas inertes par rapport à ce qui se passe dans le four et le choix des réfractaires qui se trouvent en contact avec les fumées, la flamme ou la charge est fortement conditionné par les caractéristiques de ces derniers.

Les matériaux fibreux, qui sont très poreux, sont exclus lorsqu'il y a contact avec une charge liquide ou lorsqu'il y a risque de projection de liquide. Ils sont également à éviter lorsque les gaz issus de la combustion comportent des éléments corrosifs (gaz sulfureux par exemple).

Au contact d'une charge liquide (fours de fusion), on utilise des produits compacts et lourds à forte teneur en élément réfractaire de base (alumine, magnésie ou autres).

Outre les corrosions d'origine chimique, les réfractaires peuvent être soumis à des érosions mécaniques. C'est le cas par exemple des fours poussants de métallurgie dans lequel

l'avancement des produits par glissement impose, pour la sole, des matériaux réfractaires très durs (corindon, par exemple) ; des zones de convection des fours de raffinage du pétrole équipées de ramoneurs à vapeur, si les jets de vapeur peuvent venir au contact des parois ; des fours rotatifs dans lesquels la charge avance par glissement sur les parois

### **6. Dimensionnement des parois réfractaires**

Une fois déterminée la qualité de la première couche de réfractaire, en fonction du niveau de température dans le four et des interactions chimiques en surface, le choix et le dimensionnement des couches réfractaires et isolantes arrières sont choisies en fonction des déperditions thermiques et/ou de la température de paroi extérieure maximale acceptables. Ce calcul se fait généralement, en supposant l'équilibre thermique atteint, avec comme objectifs :

- de trouver un optimum entre des épaisseurs et des déperditions énergétiques économiquement acceptables ;
- d'obtenir sur les parois extérieures une température compatible avec la circulation ou la présence de personnel.

Dans certains cas, les différentes contraintes sont incompatibles entre elles et sur certains fours (fours de fusion à haute température par exemple), on est conduit à refroidir les parois extérieures par de l'eau en ruissellement ou en circulation dans une double paroi métallique.

## **Exercices**

### **Exercice 1**

La paroi plane d'un four est composée de 3 couches successives de briques.

| Couche     | Matériau                | Épaisseur<br>(cm) | $\lambda_m$ (kcal/h.m.°C) |
|------------|-------------------------|-------------------|---------------------------|
| Intérieure | Briques réfractaires    | 20                | 1.01                      |
| Médiane    | Briques isolantes       | 10                | 0.22                      |
| Extérieure | Briques de construction | 15                | 0.595                     |

La température de la face intérieure du four est de 871 °C et la température de la face extérieure du four est maintenue à 52 °C par circulation d'air.

1. Calculer le flux perdu par unité de surface du four et déterminer les températures aux interfaces des couches.
2. Calculer le flux perdu par unité de surface du four en supposant qu'il existe une mince lame d'air de 6 mm d'épaisseur entre la couche de briques réfractaires et celle de briques isolantes. On supposera que les températures des faces internes et externes sont inchangées par rapport à la question 1. Dans ces conditions la conductivité thermique moyenne de l'air est 0,055 kcal.h<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>.

### **Réponse**

E2)1) Flux perdu par unité de surface du four :  $\phi = 905,3 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Températures intermédiaires :  $\Theta_1 = 691,7 \text{ °C}$ ,  $\Theta_2 = 280,2 \text{ °C}$

2) Flux perdu par unité de surface du four avec une couche d'air entre les deux couches de briques :  
 $\phi' = 807,8 \text{ kcal.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

### **Exercice 2**

La paroi plane d'un four est composée de 3 couches successives de briques :

- une couche de 15 cm de briques réfractaires d'alumine
- une couche de briques isolantes de kaolin
- une couche de 22,5 cm d'épaisseur de briques ordinaires de construction

La température des briques réfractaires de la face intérieure du four est de 982 °C. La température de la surface de contact des couches de briques réfractaires et isolantes est de 938 °C. La température de l'interface des couches de briques isolantes et de construction est de 138

°C. Dans les conditions de fonctionnement du four, les conductivités thermiques moyennes des couches de la paroi sont :

| Couche                             | $\lambda_m$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|
| briques réfractaires d'alumine     | $\lambda_1 = 1,62$                                 |
| briques isolantes de kaolin        | $\lambda_2 = 0,23$                                 |
| briques ordinaires de construction | $\lambda_3 = 1,39$                                 |

Calculer:

- 1) l'épaisseur  $e_2$  de la couche de briques isolantes de kaolin
- 2) la température de la surface extérieure du four.

**Réponse**

**E1)1) Epaisseur  $e_2$  de la couche de briques isolantes de kaolin :  $e_2 = 0,39$  m**

**2) Température de la surface extérieure du four:  $\Theta_{\text{ext}} = 61,1^\circ\text{C}$**

### Exercice 3

La paroi d'un four de 0,244 m d'épaisseur est construite avec un matériau de conductivité thermique égale à 1,3 W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>. La paroi est isolée à l'extérieur par un matériau ayant une conductivité de 0,346 W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup> pour que les pertes thermiques soient inférieures à 1830 W.m<sup>-2</sup>. La température de la paroi interne du four est égale à 1588 K et la température de la face externe est de 299 K.

Calculez l'épaisseur d'isolant nécessaire.

**Réponse**

Epaisseur de l'isolant :  $e_2 = 0,179$  m

# Conclusion

---

Les fours et les étuves se rencontrent dans un grand nombre de secteurs industriels mais principalement dans l'industrie des métaux, des matériaux et des céramiques. On distingue les fours discontinus appelés aussi fours intermittents ou fours à charge et les fours continus appelés fours tunnels ou fours à passage.

L'énergie utilisée peut être de l'électricité, du fuel lourd (FL) ou domestique (FOD), du gaz naturel ou du gaz de pétrole liquéfié (GPL).

Des formules de calcul simples, permettant de déterminer le rendement et la consommation spécifique d'un four, sont généralement suffisantes pour un prédimensionnement ou pour établir un coût d'exploitation énergétique ;

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux.

Pour une meilleure précision de calcul, il peut être utile de faire une modélisation avec un logiciel approprié.

Si le problème posé est difficile (nouvelle conception de four, produit à traiter délicat, exigence de température précise, etc.), la modélisation est nécessaire pour démontrer la faisabilité d'un projet et pour optimiser les paramètres de fonctionnement au démarrage de l'installation.

Dans le cadre d'un investissement pour installer un nouveau four ou pour modifier un four existant, il est nécessaire de calculer les échanges thermiques. Indépendamment de la qualité du matériel, les conditions d'exploitation du four ou de l'étuve vont influencer ses performances.

***Références bibliographiques***

1. Introduction aux transferts thermiques, Cours et exercices corrigés J.-L. Battaglia, A. Kusiak, J.-R. Puiggali, 2<sup>ème</sup> Eds. DUNOD, 2014.
2. Énergie, pollution de l'air et développement durable C. Ronneau, Presses universitaires de Louvain, 2004
3. Techniques de l'ingénieur, Fours industriels I. JACUBOWEZ, BE8842 V1-1998
4. Techniques de l'ingénieur, thermique des fours. Gérard Paniez, BE 9 510v2 – 2013
5. Diagramme d'Ostwald, exercice d'application
6. Bonnefoy , Combustion, éléments de cours, 2014.
7. Notions sur la combustion, Contents Back
8. <https://dyrassa.com/les-combustions-exercices-corriges/>
9. Nicolas ERRIEN, transfert thermique, Université du Maine