

# SCHÉMAS THERMODYNAMIQUE

Nicolas CHIREUX

29 août 2014

## SCHÉMAS THERMODYNAMIQUE

# Chapitre 1

## Systeme ouvert en regime stationnaire

### 1.1 Outils necessaires a l'etude de systemes ouverts

#### 1.1.1 Definition du systeme

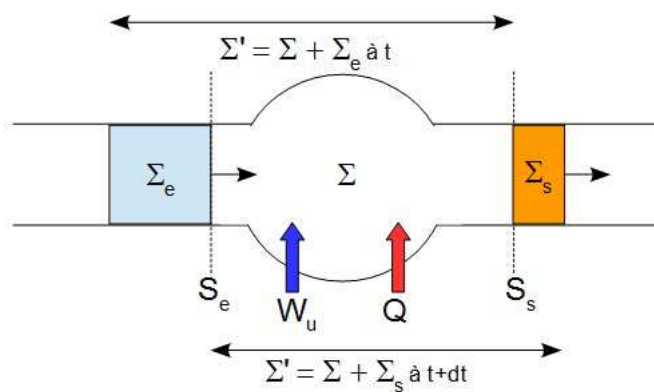


FIGURE 1.1 – Description d'un systeme ouvert

### 1.2 Bilans en systeme ouvert

### 1.3 Utilisation des diagrammes (p,h) ou diagrammes de Mollier

#### 1.3.1 Description du diagramme (p,h)

#### 1.3.2 Detente d'un fluide dans une turbine

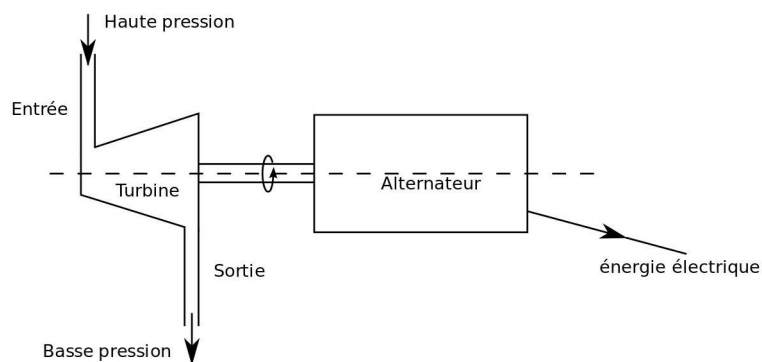


FIGURE 1.2 – Schéma de principe d'une turbine

### 1.3.3 Exemples d'associations turbine - alternateur

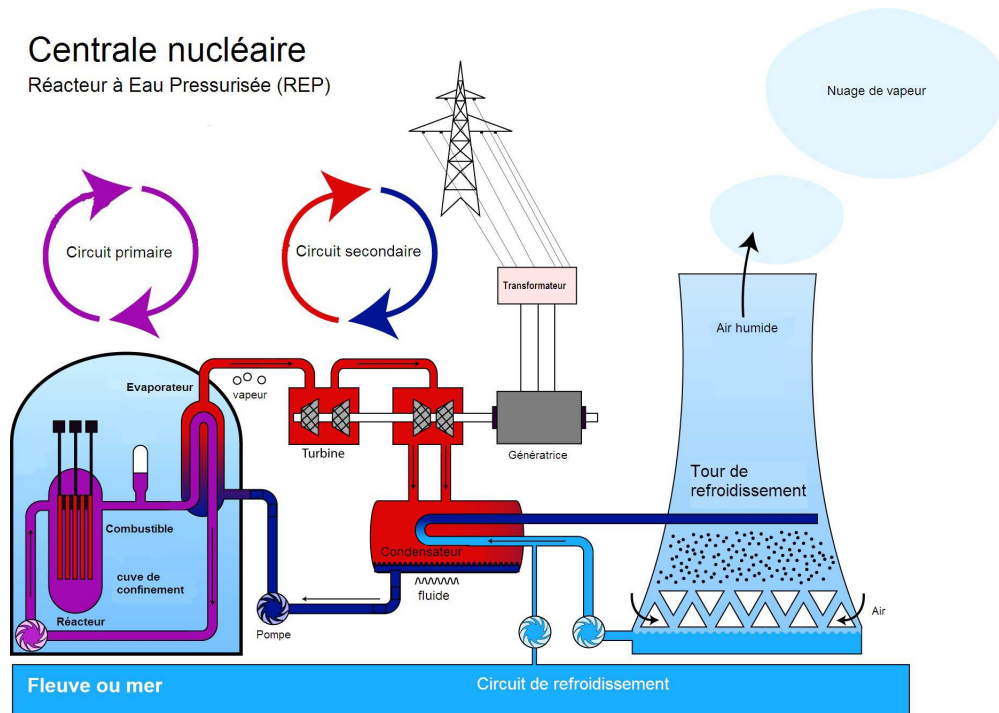


FIGURE 1.3 – Centrale nucléaire EPR

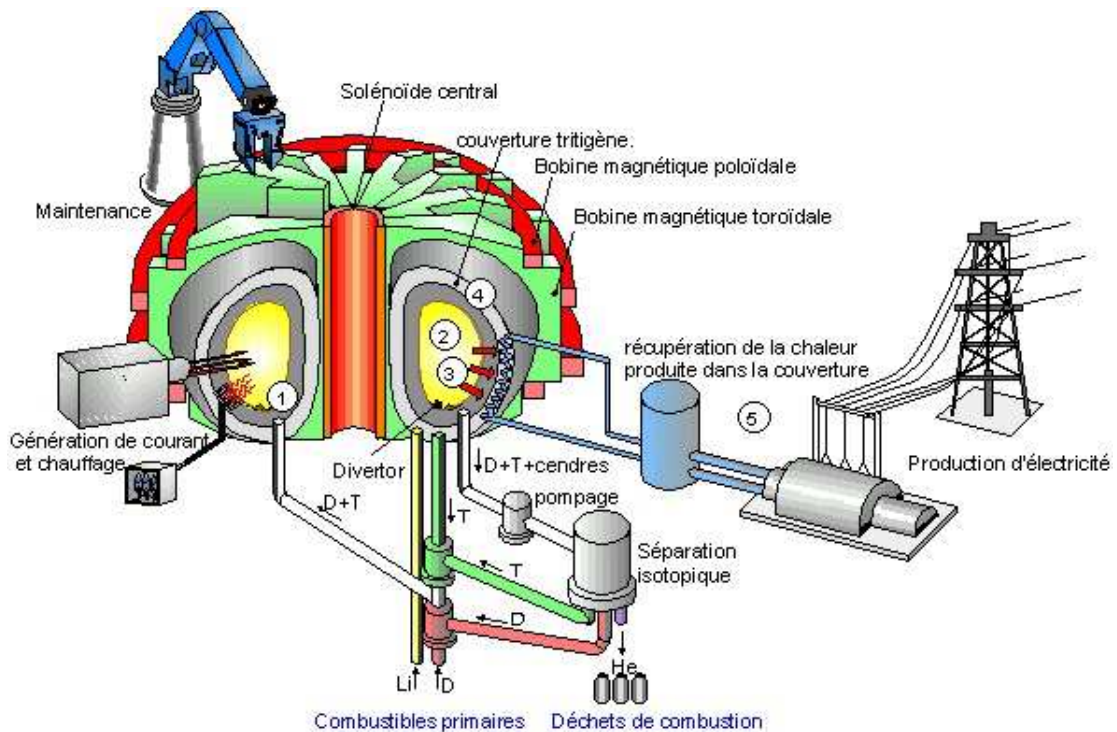


FIGURE 1.4 – Réacteur ITER



FIGURE 1.5 – Turbine EPR Flamanville



FIGURE 1.6 – Rotor EPR Flamanville

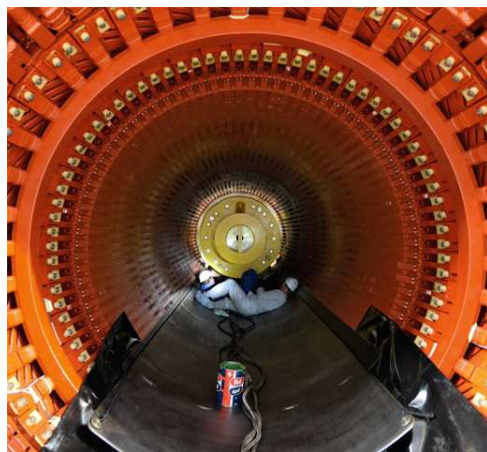


FIGURE 1.7 – Alternateur EPR Flamanville

# Chapitre 2

## Diffusion thermique

### 2.1 Modes de transfert d'énergie

#### 2.1.1 La conduction

#### 2.1.2 La convection

##### Convection naturelle

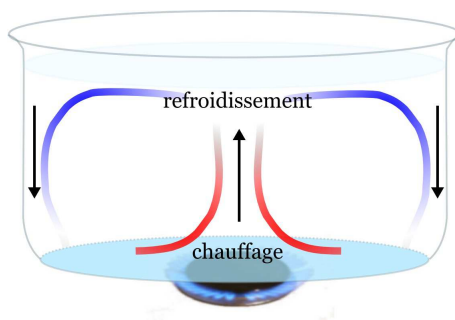


FIGURE 2.1 – Convection naturelle

##### Convection forcée

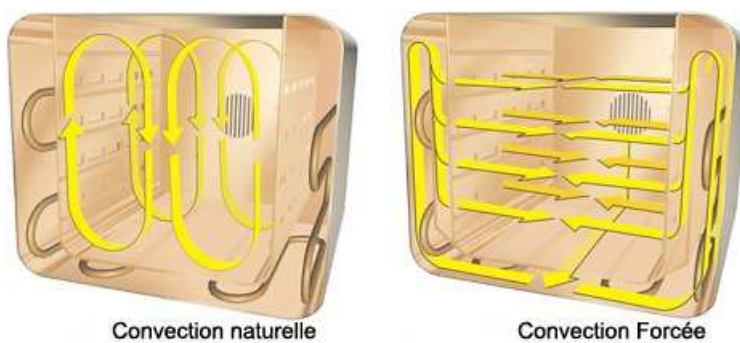


FIGURE 2.2 – Convection forcée

Le contact peut être via une plaque métallique qui opère un transfert de type conductif : c'est le cas lorsqu'on veut mettre en contact deux fluides. On dit dans ce dernier cas qu'il y a couplage conducto-convectif : l'efficacité du transfert conductif est fortement augmentée par le mouvement des fluides. C'est le principe des échangeurs thermiques.

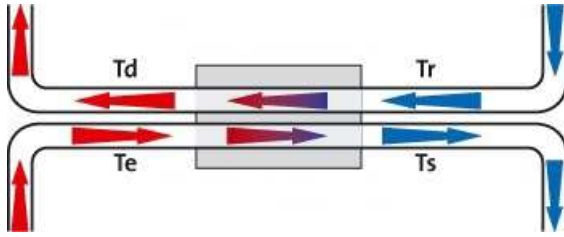
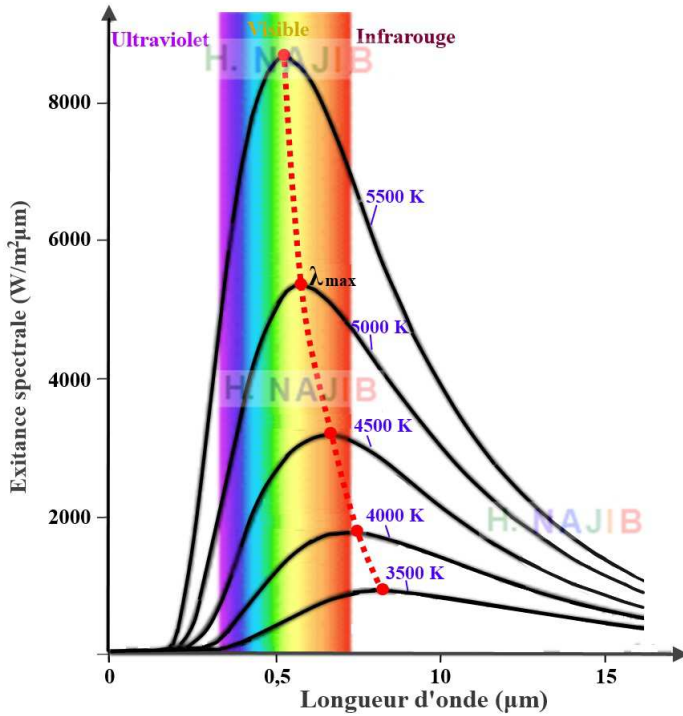


FIGURE 2.3 – Echangeur thermique

### Rayonnement thermique



Tout corps porté à une température  $T$  voit le mouvement de ses charges accéléré par agitation thermique. Comme montré en électromagnétisme, ces charges rayonnent alors un champ électromagnétique. Comme les niveaux d'énergie sont continus pour un solide, tous les photons peuvent être absorbés et donc émis - à la différence de ce qui a été vu pour une lampe spectrale -. Animation niveaux d'énergie d'un métal

Le spectre émis va donc être continu et d'autant plus décalé vers les faibles longueurs d'onde que la température est élevée.

Le corps humain à  $300K$  a son maximum d'émission dans l'I.R. à  $9.7\mu m$ .

FIGURE 2.4 – Rayonnement d'un corps noir

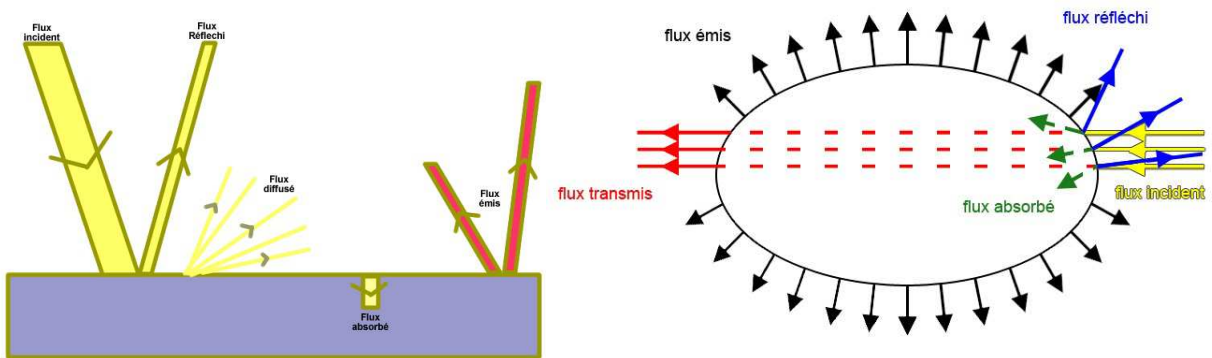


FIGURE 2.5 – Interaction matière-rayonnement

En général, nous observerons dans les phénomènes physiques une superposition des trois modes de transfert même si pour simplifier, nous négligerons le rayonnement dans nombre d'exercices.

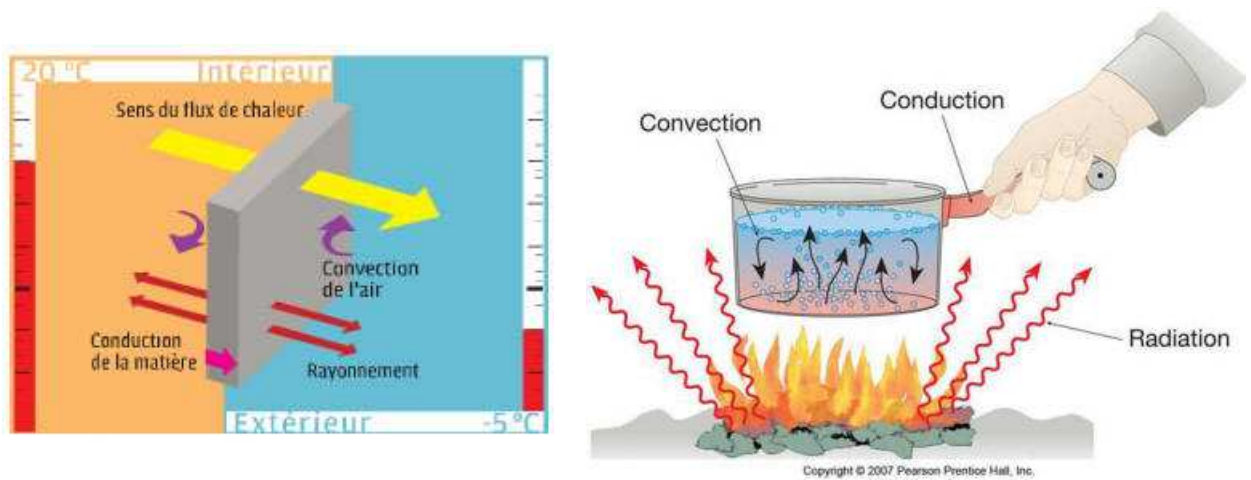


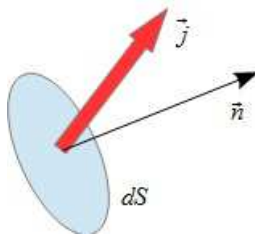
FIGURE 2.6 – Les trois types de transferts thermiques

## 2.2 L'axiome d'équilibre local thermodynamique ETL

## 2.3 Les flux d'énergie

### 2.3.1 Les flux surfaciques

#### Définition



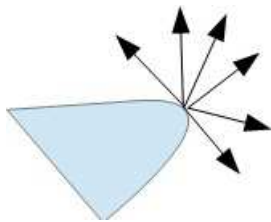
Soit un petit élément de surface  $dS$  de vecteur surface  $d\vec{S} = dS\vec{n}$ .

La puissance thermique ou flux traversant l'élément de surface  $dS$  dans le sens de  $\vec{n}$  est  $\delta\phi = \varphi dS$  où  $\varphi$  est le flux surfacique en  $W.M^{-2}$ .

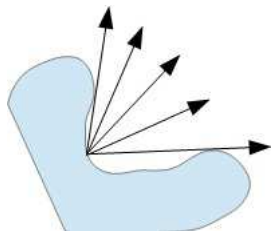
Dans certains cas, on peut exprimer  $\varphi$  à l'aide d'un vecteur flux surfacique ou vecteur densité de courant thermique  $\vec{j}$  tel que  $\varphi = \vec{j} \cdot \vec{n}$ .

$$\text{Alors } \delta\phi = \vec{j} \cdot \vec{n} dS = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

#### Expressions pour les divers modes de transfert



L'émission ou l'absorption due au rayonnement dans le cas d'un corps convexe balaye une zone hémisphérique - un demi-espace -. Dans ce cas le corps ne pourra pas absorber son propre rayonnement.



L'émission ou l'absorption due au rayonnement dans le cas d'un corps concave balaye une zone inférieure à un hémisphère. Dans ce cas le corps pourra ré-absorber une partie de son propre rayonnement.



### 2.3.2 Puissances volumiques

## 2.4 Diffusion thermique

### 2.4.1 Loi de Fourier

Enoncé

Analogie avec la loi d'Ohm

On peut dresser le tableau suivant :

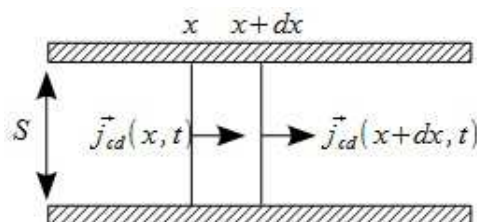
Thermodynamique	Electricité
$\vec{j}_{cd}$ densité de courant de conduction thermique	$\vec{j}$ densité de courant
$T$ température	$V$ potentiel
$\lambda$ coefficient de conductivité thermique	$\gamma$ conductivité électrique
$\vec{j}_{cd}(\vec{r}, t) = -\lambda \vec{\nabla} T(\vec{r}, t)$ loi de Fourier	$\vec{j}(\vec{r}, t) = -\gamma \vec{\nabla} V(\vec{r}, t) = \gamma \vec{E}$
$\phi^{cd}$ flux conductif	$I$ intensité

Ces lois sont des lois phénoménologiques : elles sont en général bien vérifiées. Mais ce ne sont pas des lois fondamentales comme la loi de la gravitation. Ce sont des approximations linéaires au premier ordre valables uniquement en présence de gradients faibles.

Ordres de grandeur

### 2.4.2 Equation de la chaleur

### 2.4.3 Conduction pure à une dimension

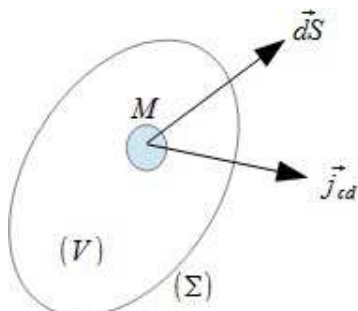


Nous nous placerons dans le cas unidimensionnel : les diverses grandeurs ne dépendront donc que de  $x$  et  $t$ .

Nous considérerons comme système la tranche de section  $S$  d'épaisseur  $dx$  comprise entre  $x$  et  $x + dx$  comme indiqué ci-dessous. Les parois latérales sont calorifugées.

Généralisation - Termes de source

### 2.4.4 Diffusion thermique à 3 dimensions



Reprenons le bilan précédent mais sur un volume ( $V$ ) délimité par une surface ( $\Sigma$ ) :

$$\iiint_V \mu c \frac{\partial T}{\partial t} d\tau = - \iint_{\Sigma} \vec{j}_{cd} \cdot d\vec{S} + \iiint_V p_{autres} d\tau \quad (2.1)$$

où  $p_{autres}$  est la puissance volumique associée à  $P_{autres}$

## 2.4.5 Solutions de l'équation de la diffusion thermique

### Unicité de la solution

#### Cas stationnaire - Résistance thermique

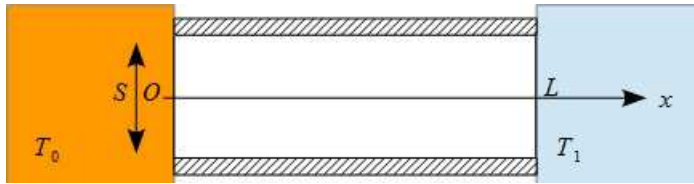


FIGURE 2.7 – Barre calorifugée latéralement en contact avec deux thermostats

#### Association de résistances thermiques

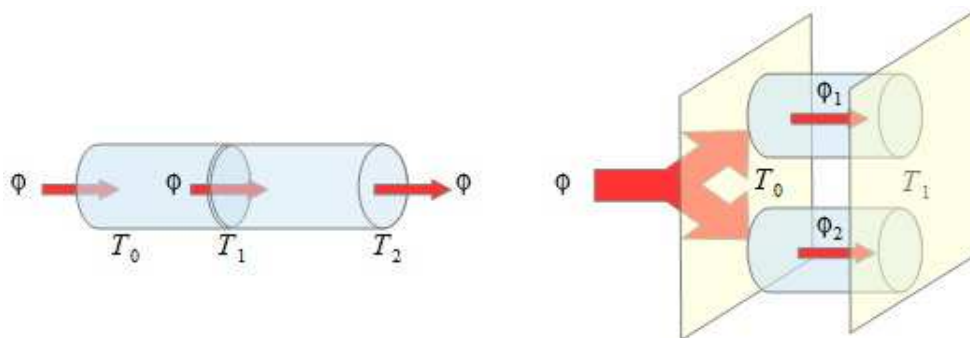
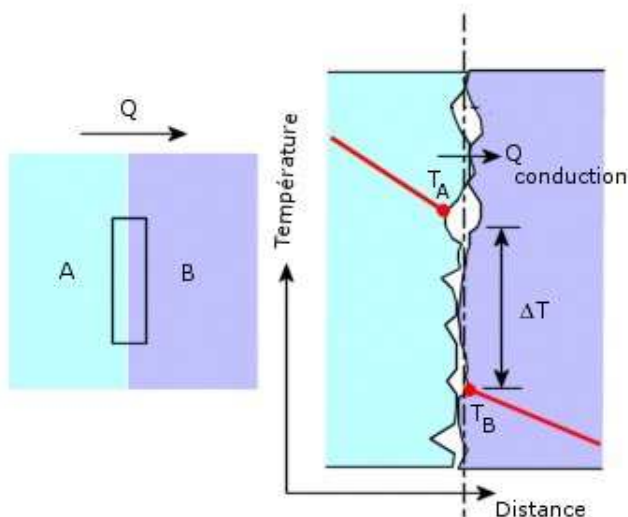


FIGURE 2.8 – Associations de résistances thermiques en série et en parallèle

#### Cas stationnaire - Problème à symétrie cylindrique

#### Cas stationnaire - Problème à symétrie sphérique

#### Conditions aux limites



Si l'interface est en  $x = x_0$ , on aura

$$-S\lambda_A \left( \frac{\partial T_A}{\partial x} \right)_{x_0,t} = -S\lambda_B \left( \frac{\partial T_B}{\partial x} \right)_{x_0,t} \quad (2.2)$$

Si de plus le contact est parfait - surfaces idéalement lisses -, on aura de surcroît

$$T_A(x_0, t) = T_B(x_0, t) \quad (2.3)$$

## Cas non stationnaire

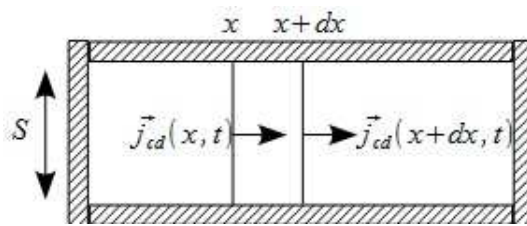
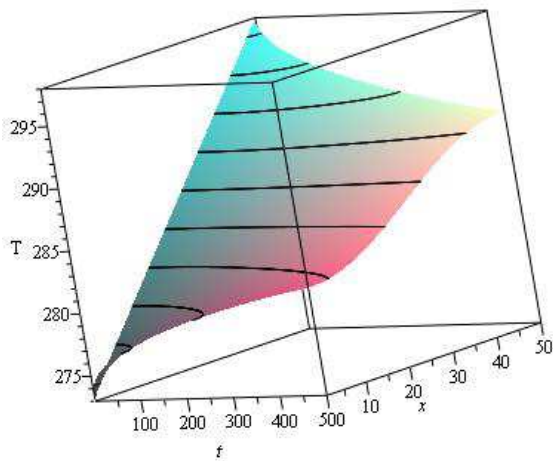
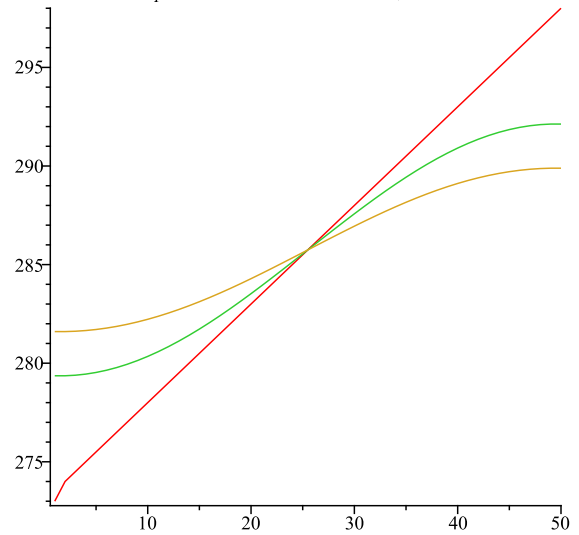


FIGURE 2.9 – Barre complètement calorifugée en régime non stationnaire

Evolution de la température dans une barre calorifugée



Evolution de la température dans une barre à  $t=0s$ ,  $t=250s$  et  $t=500s$



Evolution de la température dans une barre à  $t=0s$ ,  $t=250s$  et  $t=500s$  avec 10 modes

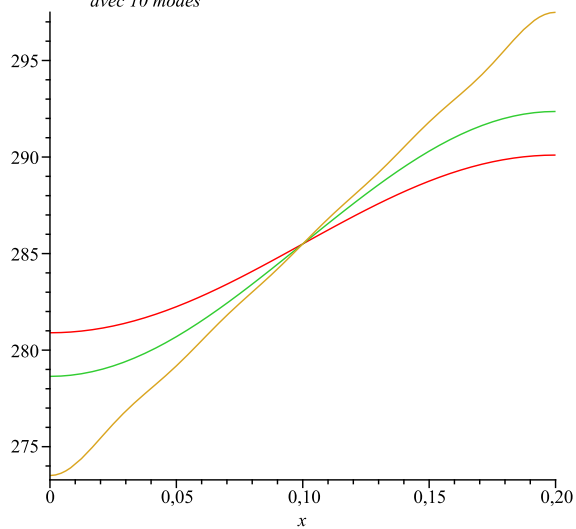
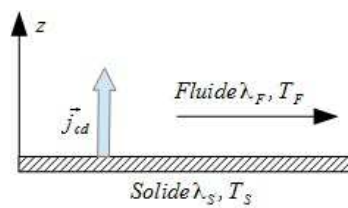


FIGURE 2.10 – Simulation avec une résolution numérique par maillage (en haut) et la résolution précédent avec 10 modes (ci-contre)

## 2.5 Transfert thermique conducto-convectif

### 2.5.1 Le flux conducto-convectif



Soit une paroi solide l ch e par un fluide au contact. Au niveau de la paroi le flux conductif dans le solide est

$$j_{cd}^S = -\lambda_S \left( \frac{\partial T_S}{\partial z} \right)_{paroi} \quad (2.4)$$

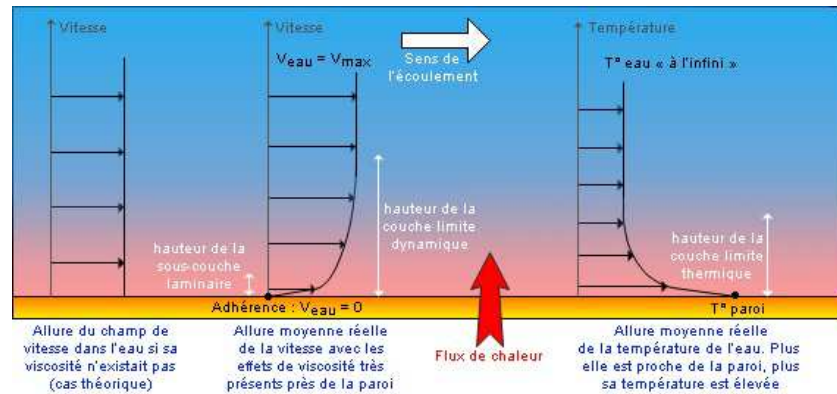


FIGURE 2.11 – Couche limite

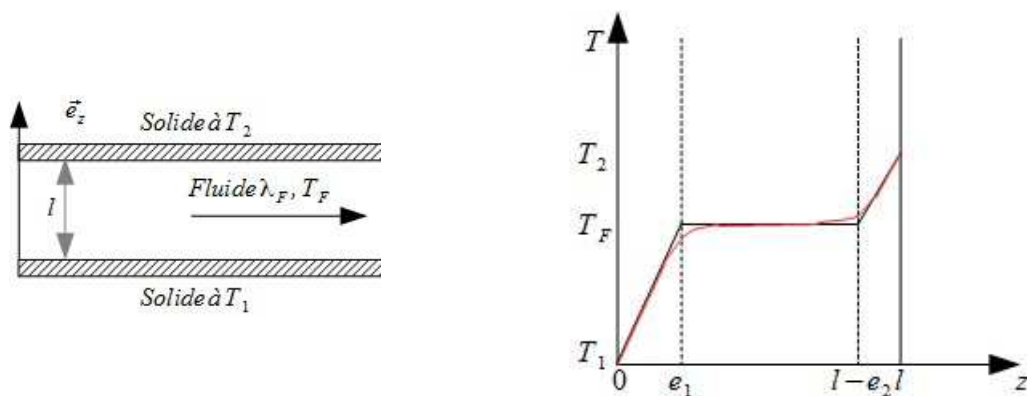
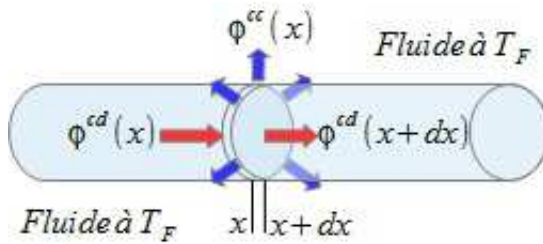


FIGURE 2.12 – Fluide circulant entre deux plaques respectivement    $T_1$  et  $T_2$  - Profil de température

### 2.5.2 Résistance thermique conducto-convective

#### Définition

Soit une barre cylindrique de longueur  $L$ , de surface latérale totale  $S_{lat}$  pour laquelle existe un transfert conducto-convectif à travers la paroi latérale.



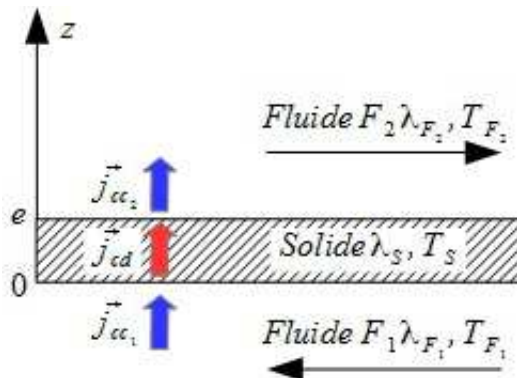
Pour la tranche d'épaisseur  $dx$ , nous aurons

$$d\phi^{cc} = h(T(x) - T_F) \frac{S_{lat}}{L} dx \quad (2.5)$$

FIGURE 2.13 – Ailette de refroidissement

### Cas d'un échangeur thermique

Revenons sur le cas de l'échangeur thermique qui permet un transfert thermique conducto-convectif entre deux fluides  $F_1$  et  $F_2$  via une plaque métallique  $S$  d'épaisseur  $e$  et de surface  $S$ .



Il est évident que nous avons ici trois résistances thermiques en série : une conducto-convective avec le fluide  $F_1$ , une conductive pour  $S$  et une autre conducto-convective avec le fluide  $F_2$ . Alors

$$R_{th}^{cc} = R_{th1}^{cc} + R_{thS}^{cd} + R_{th2}^{cc} \quad (2.6)$$

Soit

$$\frac{1}{h_{eq}S} = \frac{1}{h_1S} + \frac{e}{\lambda S} + \frac{1}{h_2S} \quad (2.7)$$

FIGURE 2.14 – Echangeur thermique

### 2.5.3 Ailette de refroidissement de grande longueur

Soit une barre cylindrique de longueur  $L$ , de rayon  $a$  pour laquelle existe un transfert conducto-convectif à travers la paroi latérale. En  $x = 0$ , elle est en contact avec un thermostat à  $T_0$  et eu égard à sa grande longueur, son extrémité en  $x = L$  est à  $T_F$ .

Rem : attention ! si la longueur de l'ailette n'est pas suffisante, son extrémité ne sera pas à la température du fluide dans lequel elle baigne.

Nous supposons que le rayon de l'ailette est suffisamment faible pour assurer une température homogène dans toute tranche  $dx$  du système. Nous nous placerons de surcroît en régime stationnaire.

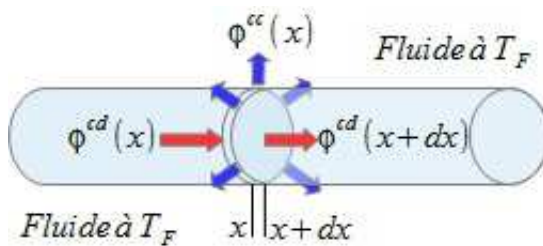


FIGURE 2.15 – Ailette de refroidissement