



# TRANSFERT DE CHALEUR

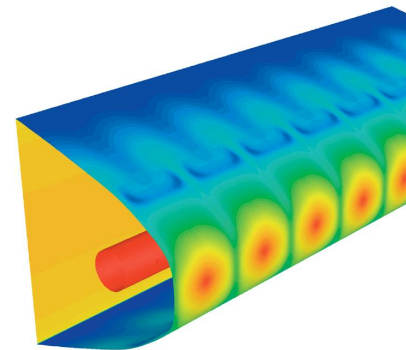
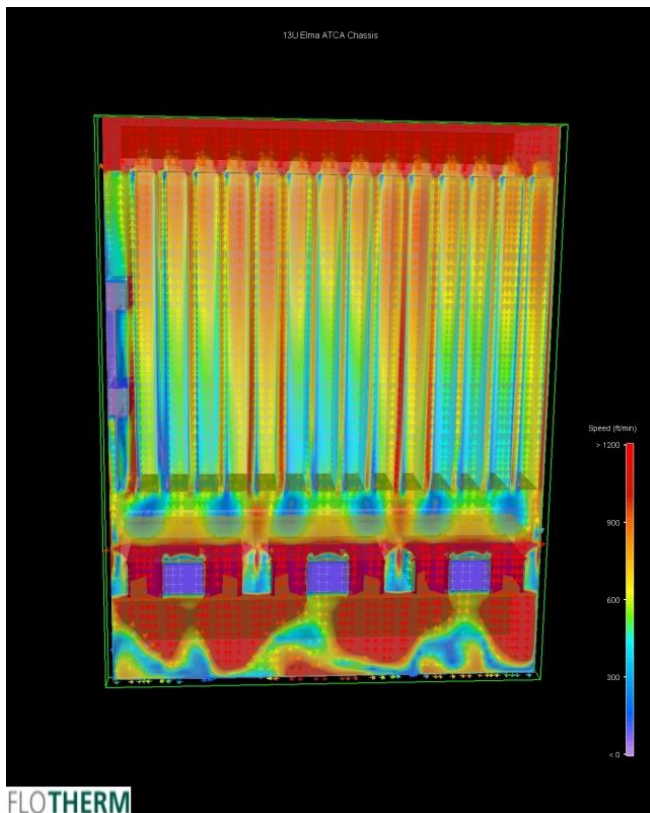
## CONVECTION

# INTRODUCTION

- Convection thermique:
  - L'ensemble des phénomènes de transfert de chaleur impliquant la présence d'un fluide en mouvement

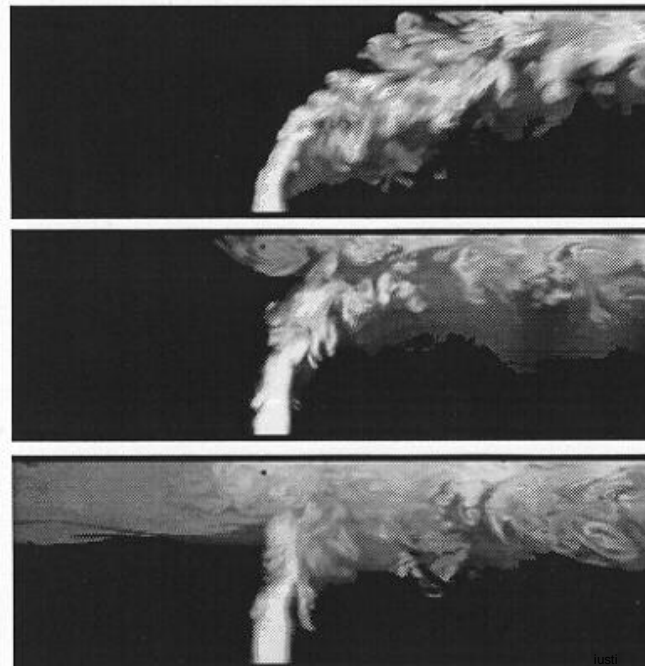
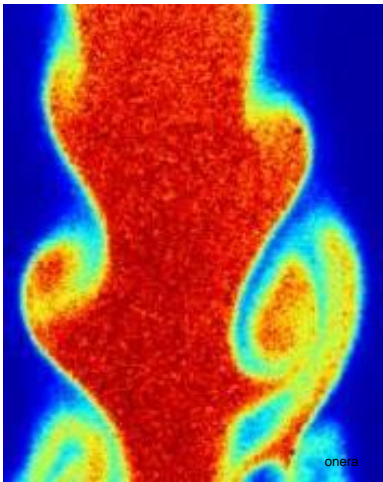
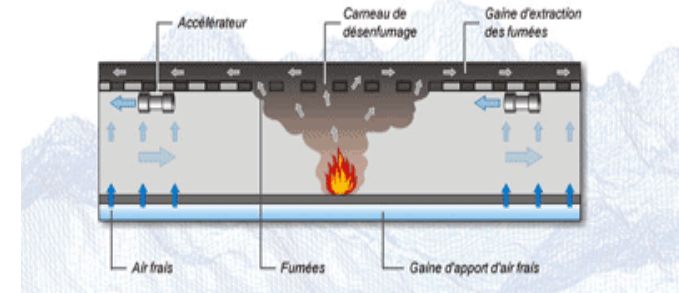
# INTRODUCTION: Exemples

- Echanges thermiques entre un fluide et un solide



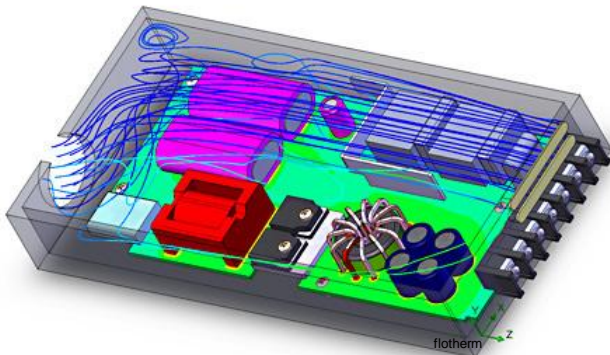
# INTRODUCTION: Exemples

- Echanges thermiques entre 2 fluides:



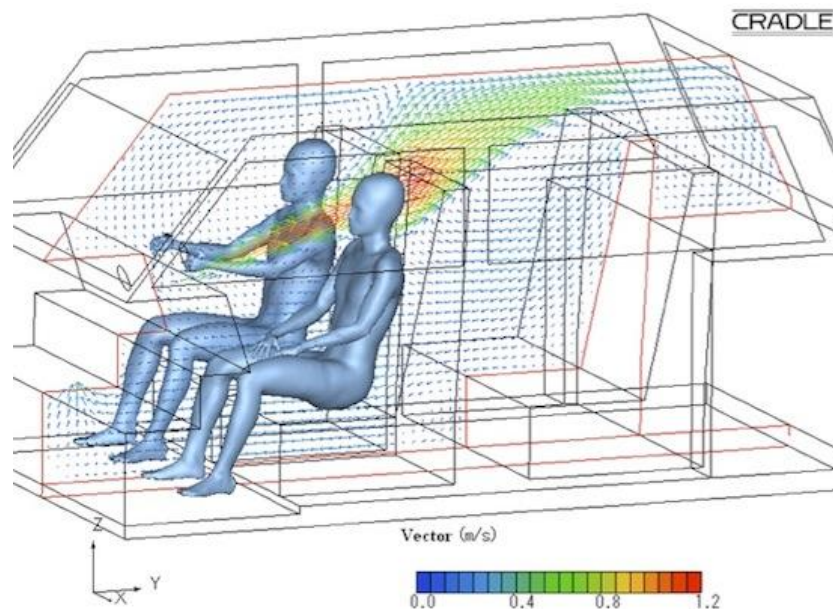
# INTRODUCTION

- Convection forcée et naturelle:
  - Mise en mouvement du fluide:
    - Convection forcée: moyen mécanique:
      - Ventilateur
      - Pompe
      - ...



# INTRODUCTION

- Convection forcée et naturelle:
  - Mise en mouvement du fluide:
    - Convection naturelle: variation de densité



# INTRODUCTION: Plan

- Généralités
  - Approche microscopique et macroscopique
  - Convection de masse/Convection de chaleur
- Analogie dynamique/convection
  - Relation vitesse/température
- Mise en équation
- Plaque plane
  - Analyse des ordres de grandeurs
  - Résolution exacte
- Convection interne
- Convection externe (obstacle)
- Convection naturelle
- Ebullition/Condensation



# LEÇON 1: GÉNÉRALITÉS

Approche microscopique,  
macroscopique, couche limite

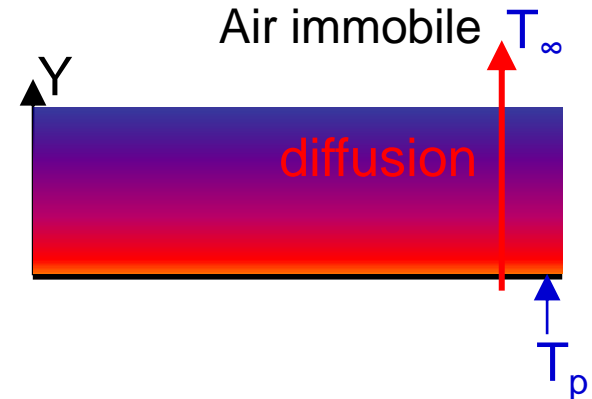
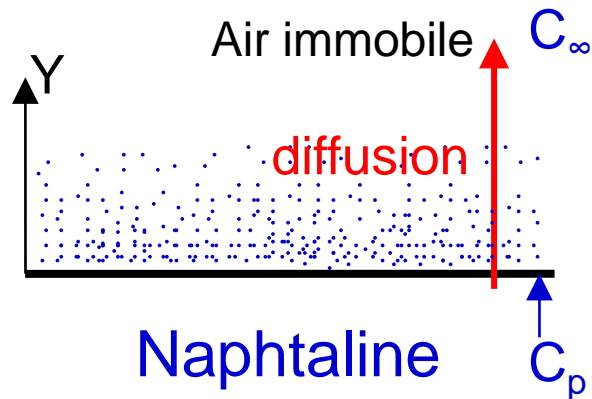


# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

## ■ Diffusion:

### □ Exemples:

- Plaques planes
- Contact avec de l'air
- Air immobile

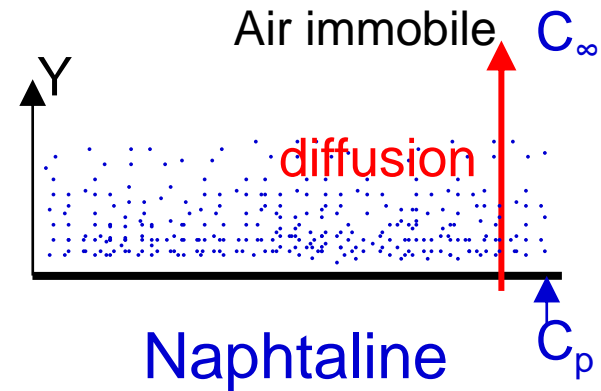


# DIFFUSION DE MASSE: point de vue microscopique

## ■ Diffusion de masse:

- Gradient de concentration de particule:

- Fort à la paroi  $C_p$
- Faible au loin  $C_\infty$



- Dans un plan donné, équiprobabilité des particules de se diriger vers le haut ou vers le bas
- MAIS, du fait de la forte concentration dans les couches proches de la paroi, chocs plus fréquents
- Flux préférentiel vers le haut

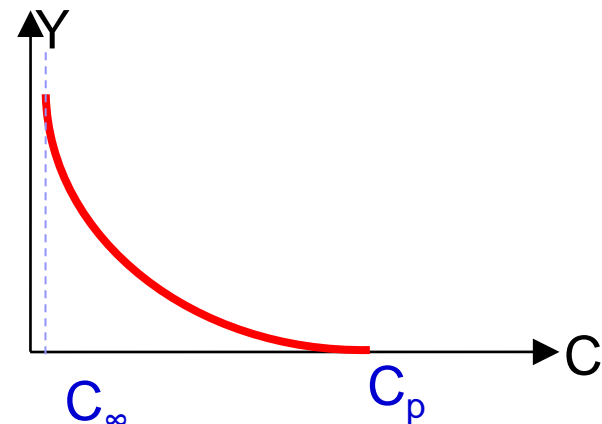
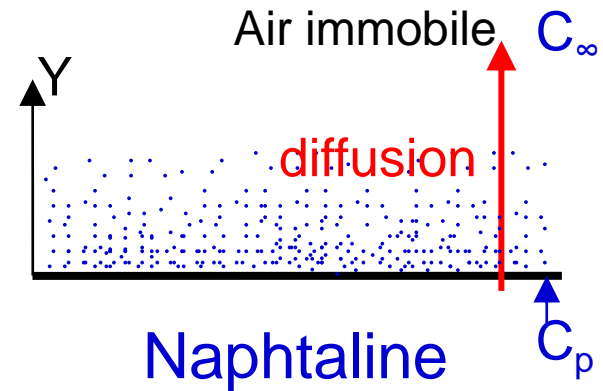
# DIFFUSION DE MASSE: point de vue macroscopique

## ■ Loi de Fick:

$$n = -D \frac{\partial C}{\partial y}$$

### □ Avec:

- $n$  = densité de flux molaire (kmol/m<sup>2</sup>s)
- $D$  = coefficient de diffusion **de la naphthaline dans l'air** (m<sup>2</sup>/s)



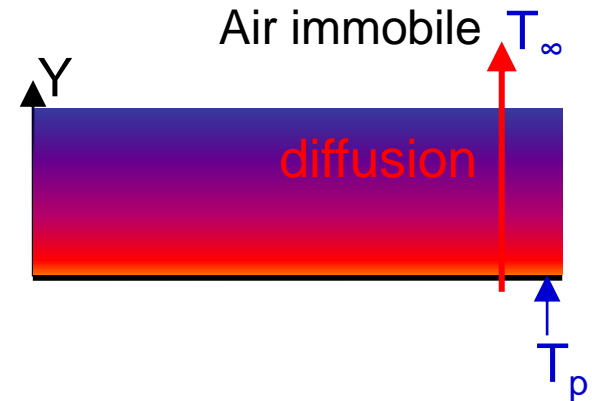
# DIFFUSION DE CHALEUR: point de vue microscopique

## ■ Diffusion de chaleur:

### □ Gradient de température:

- Haute à la paroi  $T_p$
- basse au loin  $T_\infty$

- Plus grande énergie cinétique des molécules d'air proches de la plaque (plus grande  $T$ )
- Lors des chocs, échange d'énergie cinétique  $\Rightarrow$  de  $T$
- Flux préférentiel vers le haut



# DIFFUSION DE CHALEUR: point de vue macroscopique

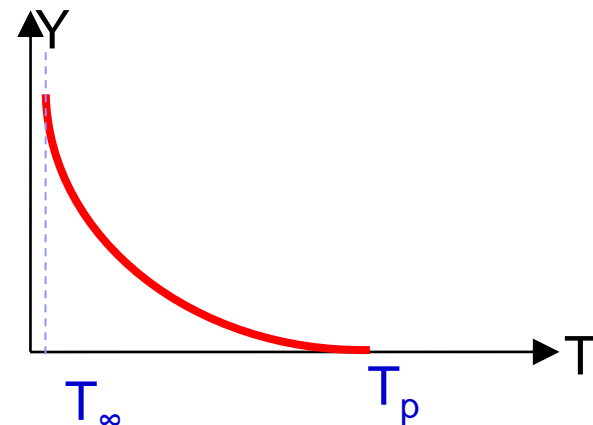
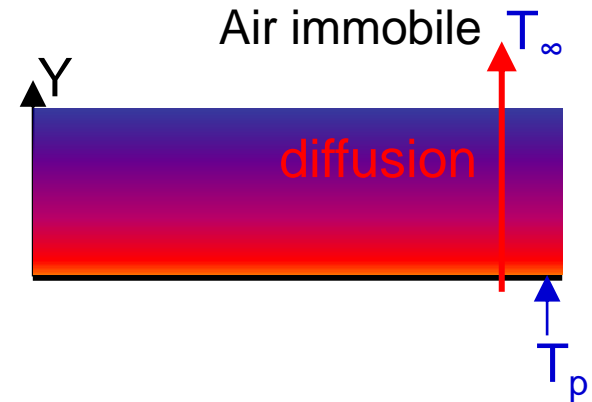
## ■ Loi de Fourier:

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$$

□ Avec:

- $\varphi$ =Densité de flux thermique ( $\text{J/m}^2\text{s}=\text{W/m}^2$ )
- $\lambda$ =conductivité thermique **de l'air** ( $\text{W/mK}$ )

## ■ Conduction

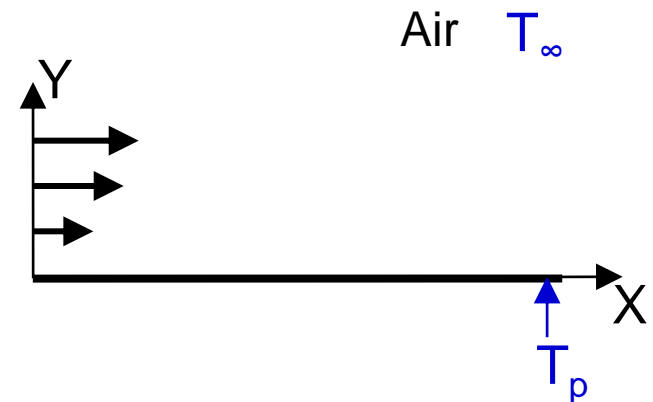
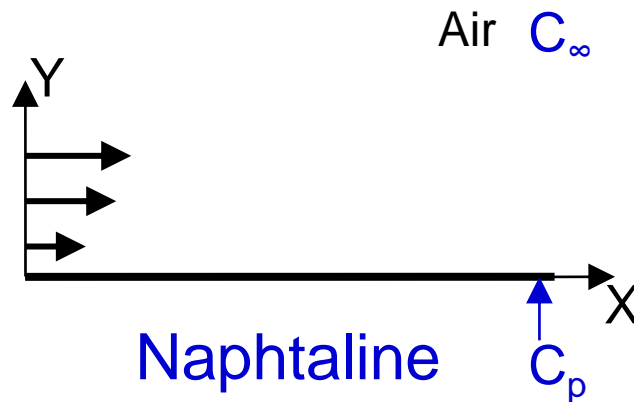


# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

## ■ Air en mouvement:

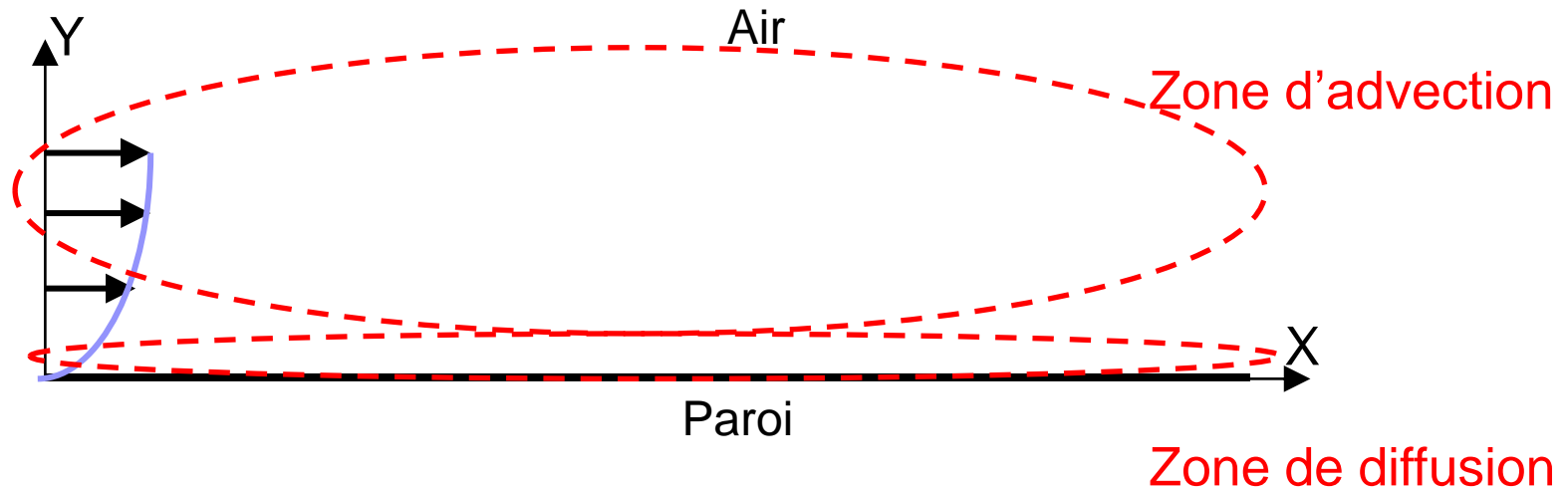
### □ Exemples:

- Plaques planes
- Contact avec de l'air
- Air en mouvement parallèle à la paroi



# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

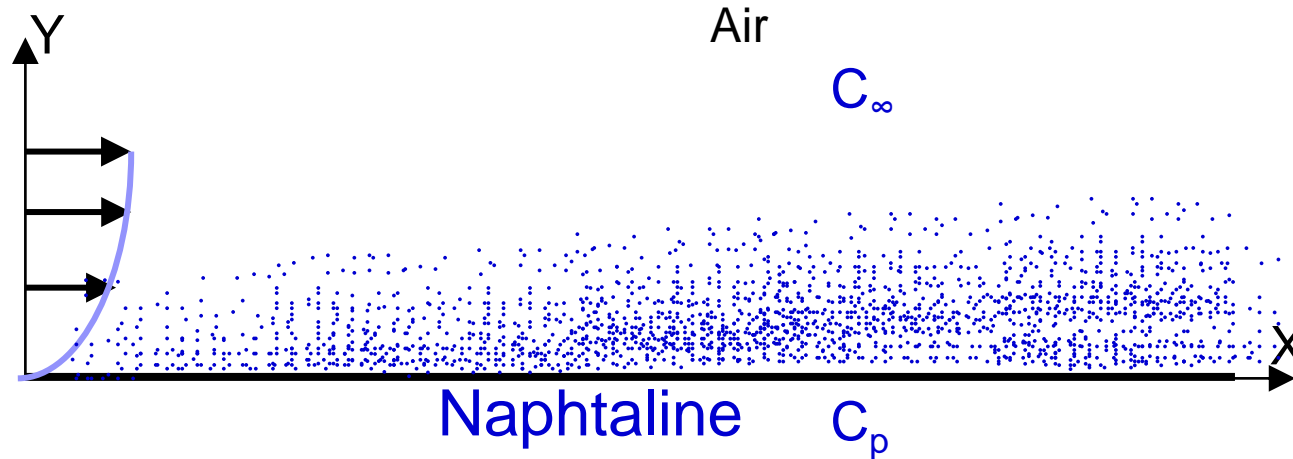
## ■ Air en mouvement:



- En très proche paroi, air immobile  $\Rightarrow$  diffusion (de masse ou de chaleur)
- Pour des Y supérieurs, le mouvement d'entraînement perturbe la diffusion

# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

- Air en mouvement:

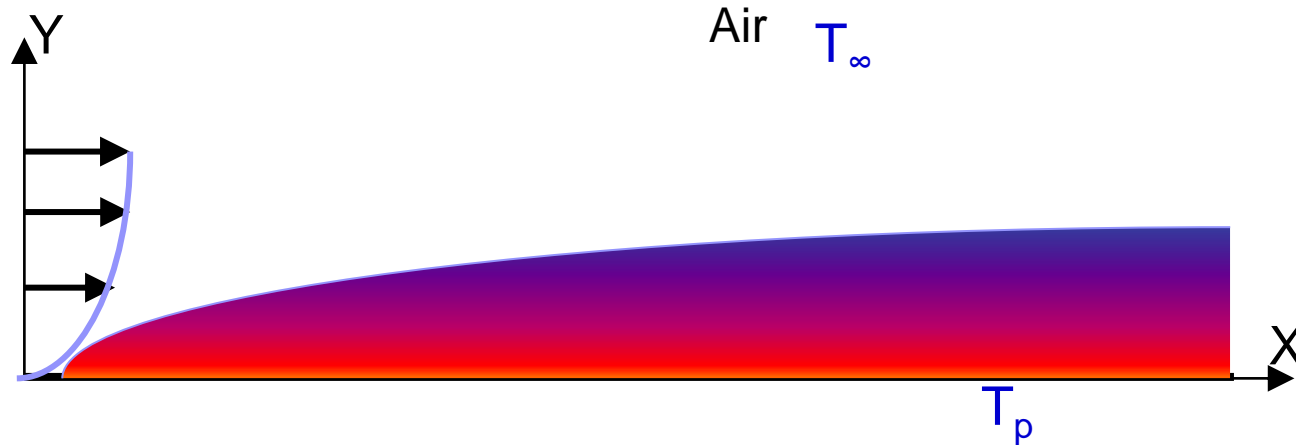


- L'entraînement va « diluer » la concentration en particules de naphtaline
- La concentration de naphtaline va dépendre de  $Y$  **mais aussi de  $X$**



# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE

## ■ Air en mouvement:

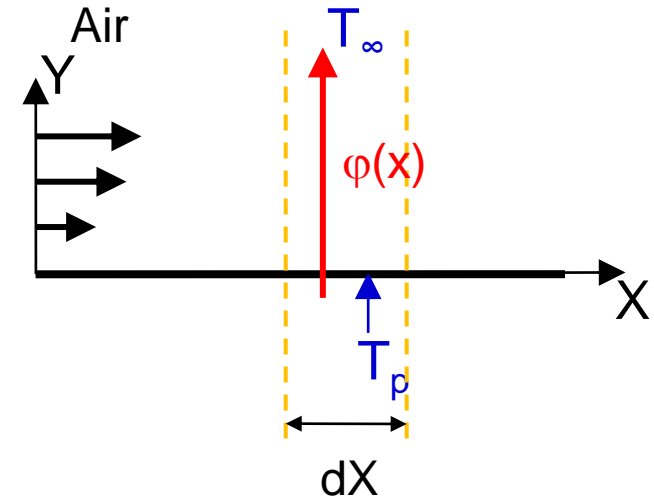
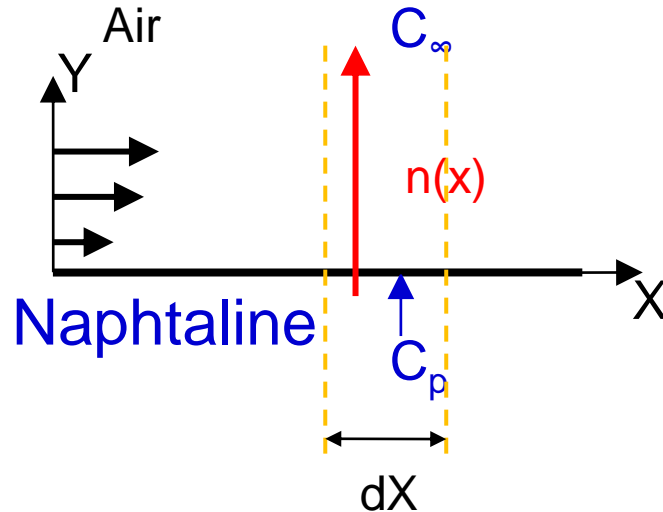


- Le gradient de température évolue de la même façon

## ■ La convection:

- Diffusion (origine microscopique), essentiellement en proche paroi
- Advection (entraînement macroscopique), plus loin de la paroi

# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE: Grandeurs locales



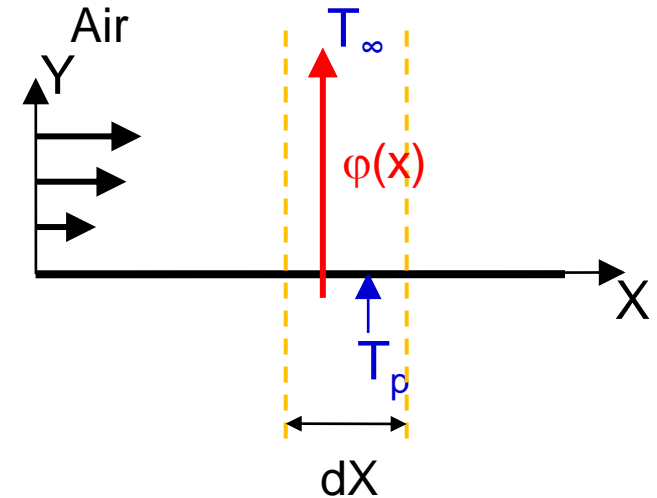
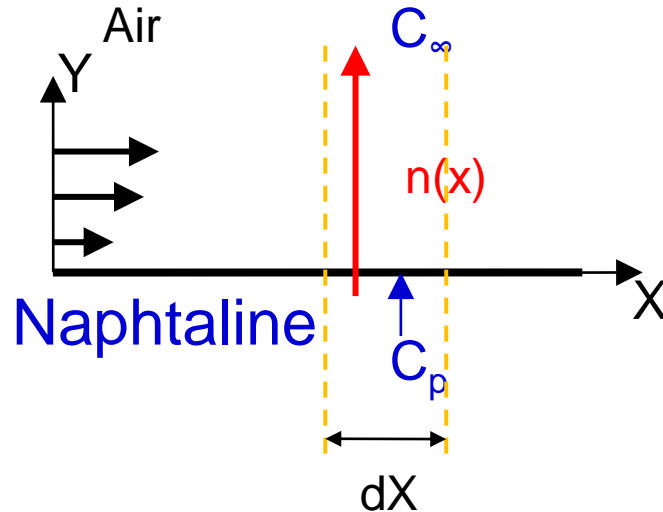
- Concentration  $C$   
( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )

- Densité de flux molaire  
 $n$  ( $\text{kmol}/\text{m}^2\text{s}$ )

- Températures  $T$  (K)

- Densité de flux thermique  
 $\phi$  ( $\text{J}/\text{m}^2\text{s}=\text{W}/\text{m}^2$ )

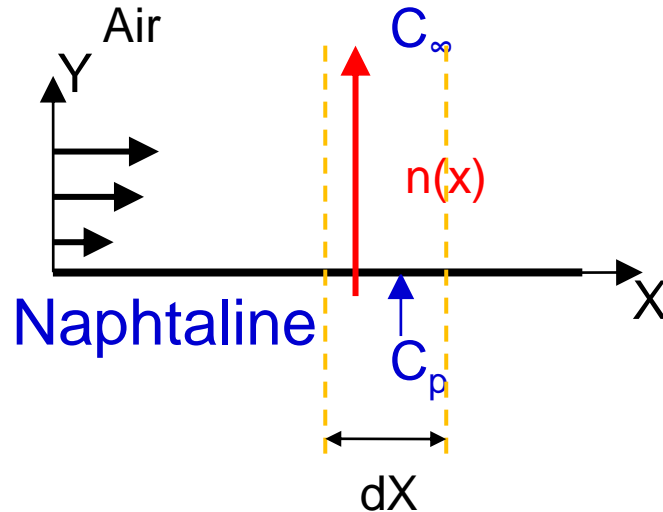
# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE: Grandeurs locales



- $n(x) = h_m(x) (C_p - C_\infty)$
- Coefficient d'échange de masse local  $h_m(x)$  ( $m^3/m^2s = m/s$ )

- $\phi(x) = h(x) (T_p - T_\infty)$  (loi de Newton)
- Coefficient d'échange de chaleur local  $h(x)$  ( $W/m^2K$ )

# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE: Grandeurs locales

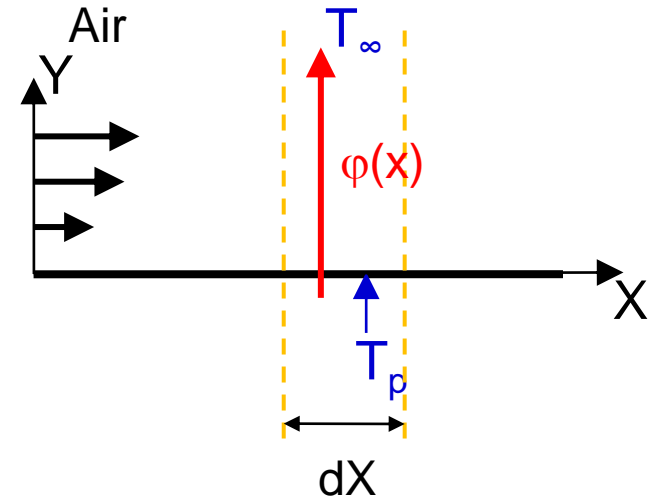


- $n(x) = h_m(x) (C_p - C_\infty)$

- Près de la paroi:

- $n(X) = -D \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{paroi}$

$$\Rightarrow h_m = \frac{-D \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{paroi}}{C_p - C_\infty}$$



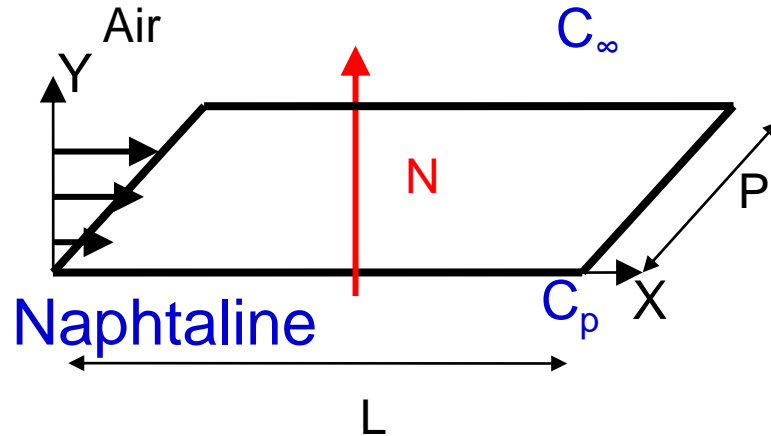
- $\phi(x) = h(x) (T_p - T_\infty)$

- Près de la paroi:

- $\phi(X) = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{paroi}$

$$\Rightarrow h = \frac{-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{paroi}}{T_p - T_\infty}$$

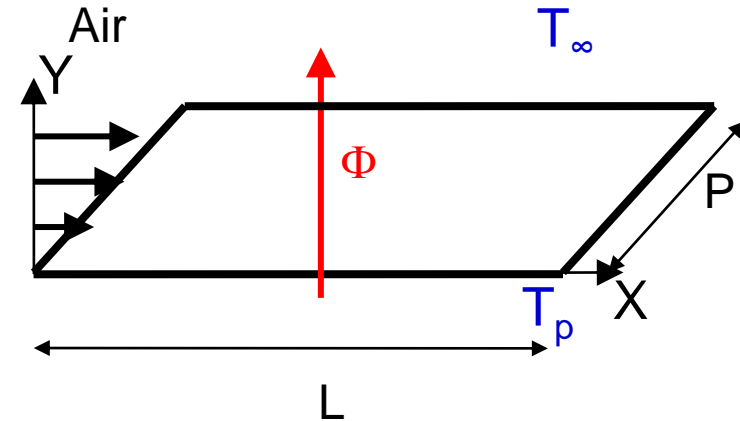
# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE: Grandeurs globales



$$\blacksquare N = \int_0^L n(x) P dx$$

$$\blacksquare \bar{h}_m = \frac{1}{L} \int_0^L h_m(x) P dx$$

$$\blacksquare N = \bar{h}_m (P.L) (C_p - C_\infty)$$



$$\blacksquare \Phi = \int_0^L \varphi(x) P dx$$

$$\blacksquare \bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) P dx$$

$$\blacksquare \Phi = \bar{h} (P.L) (T_p - T_\infty)$$

# ANALYSE DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE: Unités

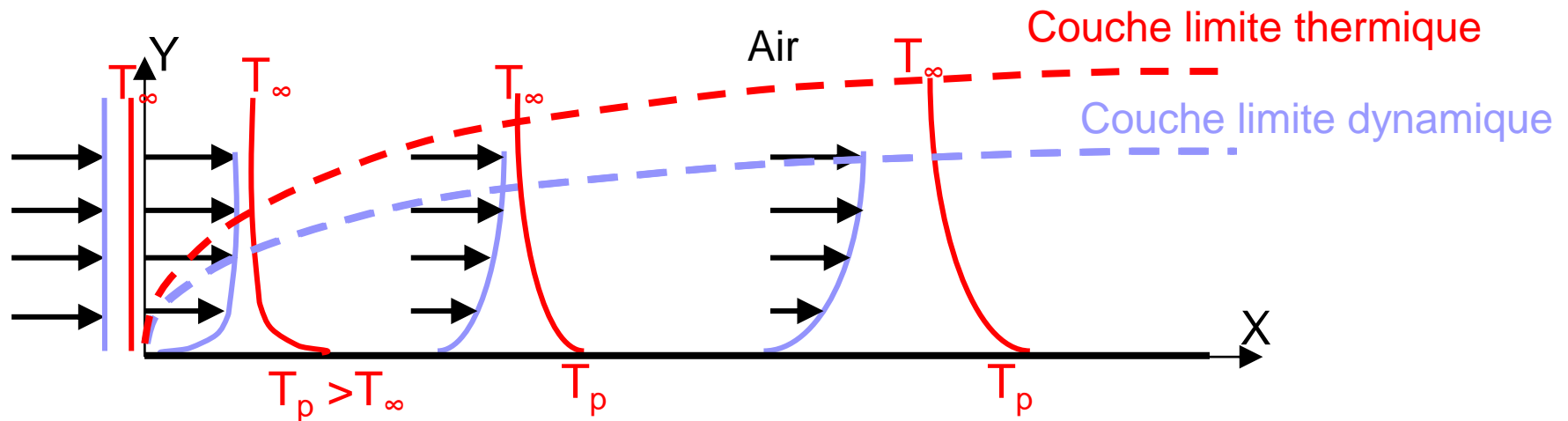
	Masse	Chaleur
Concentration/température	$\text{kmol/m}^3$	K
Densité de flux	$\text{kmol/m}^2\text{s}$	$\text{J/m}^2\text{s}=\text{W/m}^2$
Flux	$\text{kmol/s}$	W
Coefficient d'échange	$\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}=\text{m/s}$	$\text{W/m}^2\text{K}$

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES

- Transferts de chaleur par convection fortement liés à la dynamique des fluides
    - Résolution des équations de Navier Stokes+équation de l'énergie
  - Généralement dans une configuration de proche paroi
- ⇒ Notion de couches limites dynamique et thermique

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

## ■ Cas d'une plaque plane:



## ■ Epaisseur de couche limite dynamique:

- $U(x) = 0,99U_e(x)$

## ■ Couche limite thermique définie comme la couche limite dynamique:

- $T - T_\infty = 0.01(T_p - T_\infty)$

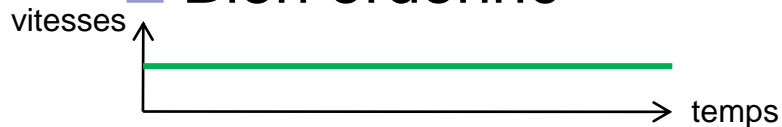


# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: régimes laminaire et turbulent

## ■ Laminaire:

- ☐ Ecoulement stable

- ☐ Bien ordonné

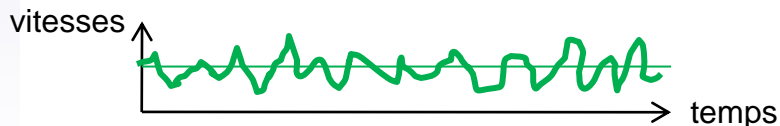


## ■ Turbulent:

- ☐ Ecoulement instationnaire,

- ☐ Eventuellement intermittent

- ☐ Caractère aléatoire



# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: régimes laminaire et turbulent

## ■ Caractérisation laminaire/turbulent:

- Nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

- Si  $Re < Re_c$ : laminaire

- Si  $Re > Re_c$ : turbulent

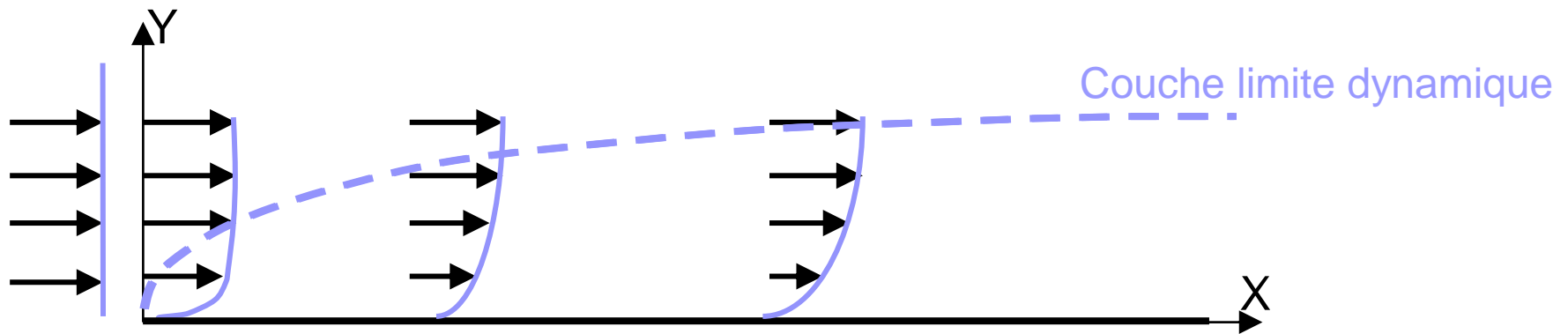
- Exemples:

- Conduite  $Re_c \approx 2000$
- Plaque plane  $Re_c \approx 5 \cdot 10^5$

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

## ■ Cas d'une plaque plane:

- Vitesses du fluide modérées
- Zone proche du bord d'attaque



⇒ Couche limite laminaire

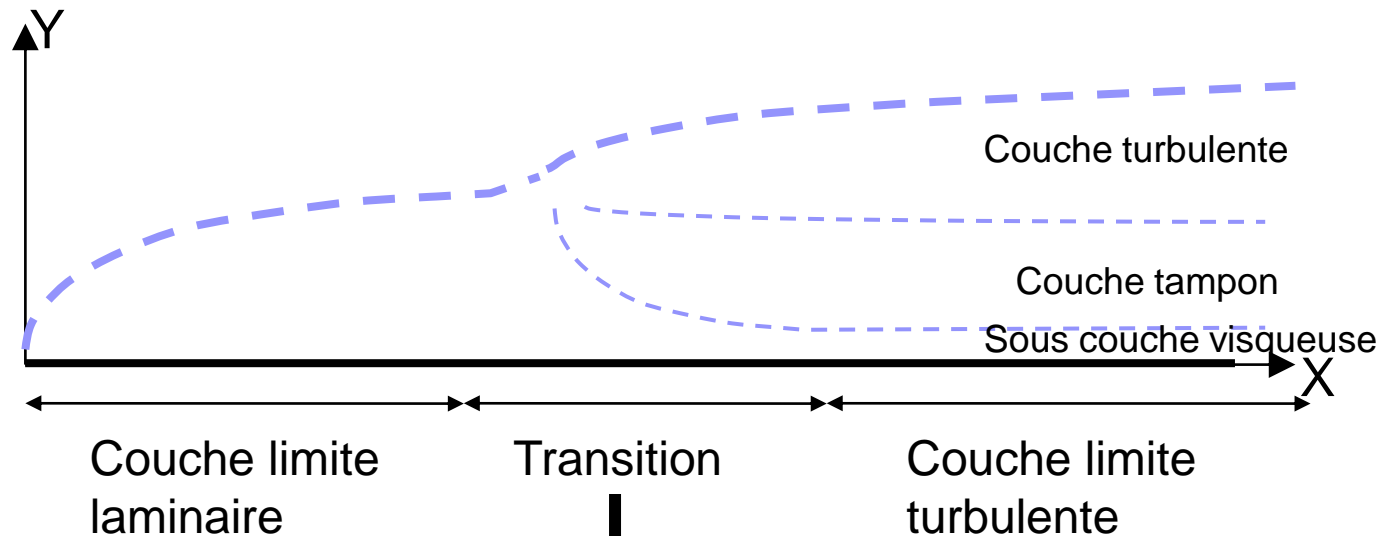
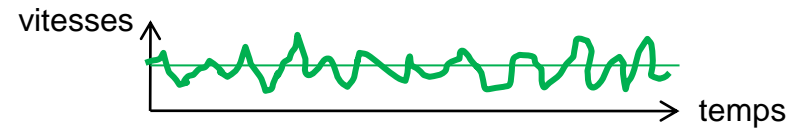
- Valable pour de nombreuses couches limites

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

- Cas d'une plaque plane:
    - Vitesses du fluides modérées
    - Vers l'aval
  - Apparition de petites fluctuations
  - Puis amplification
- ⇒ Zone de transition
- ⇒ Puis couche limite turbulente

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

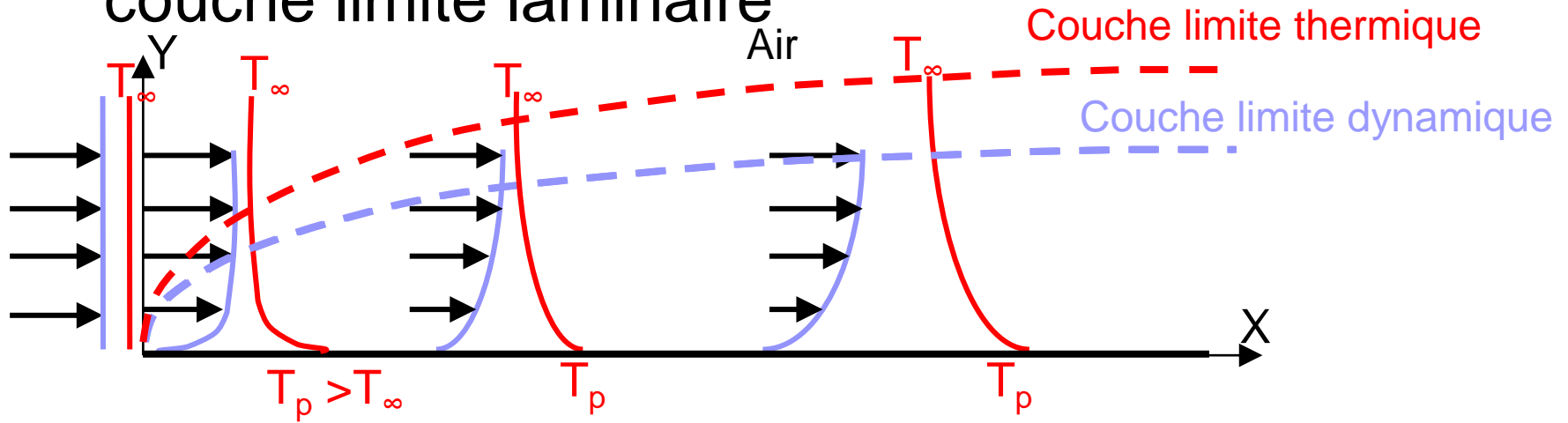
## ■ Cas d'une plaque plane: couche limite laminaire



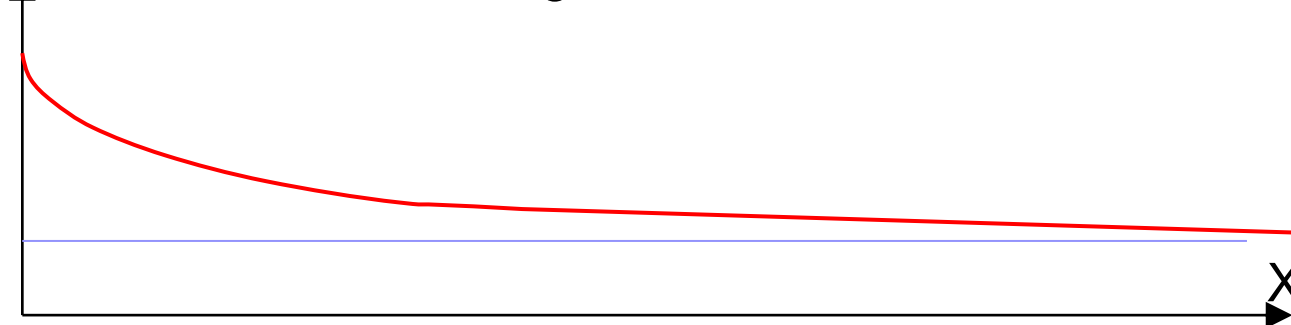
$$Re_c = \frac{\rho V X}{\mu} = 5.10^5$$

# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

- Cas d'une plaque plane: aspect thermique: couche limite laminaire

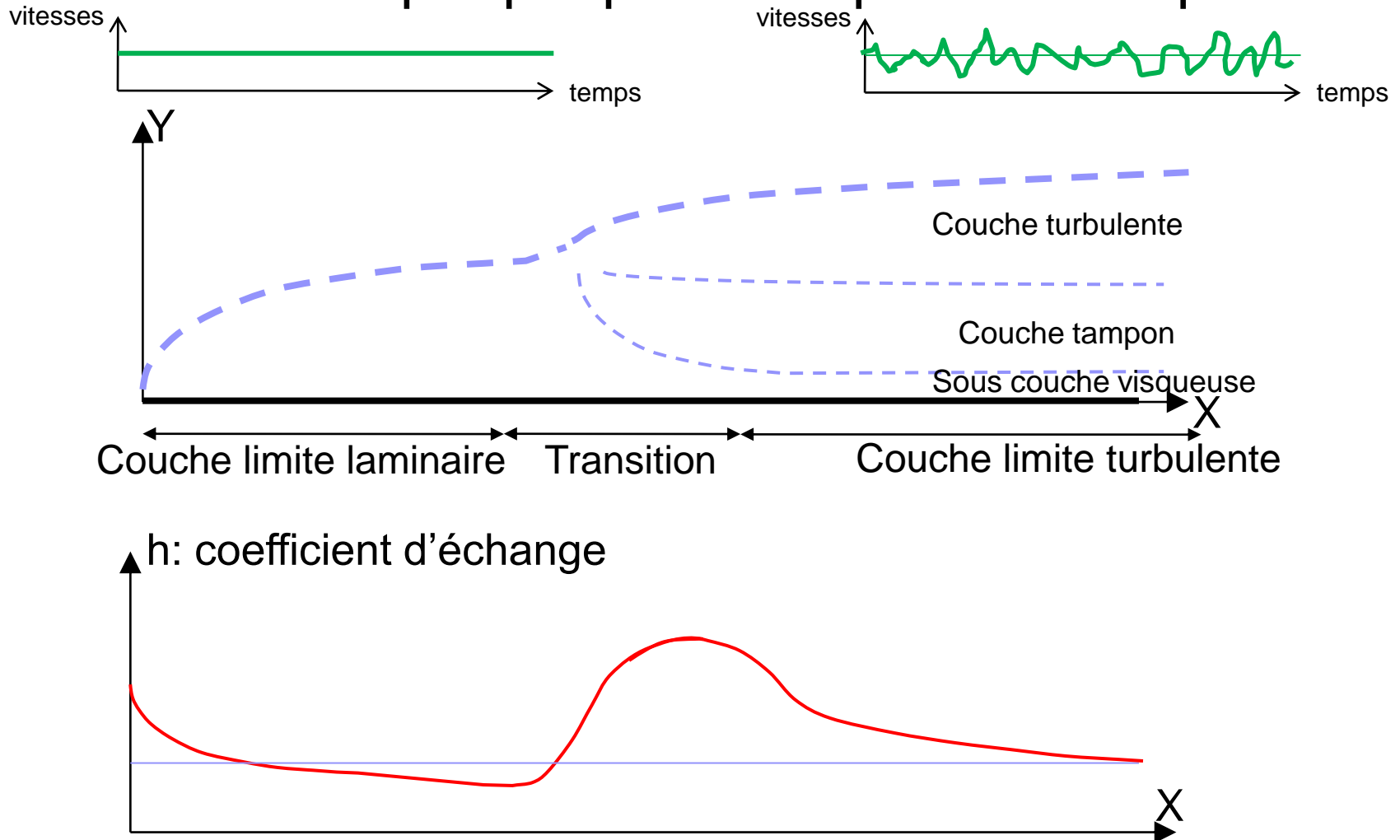


$h$ : coefficient d'échange



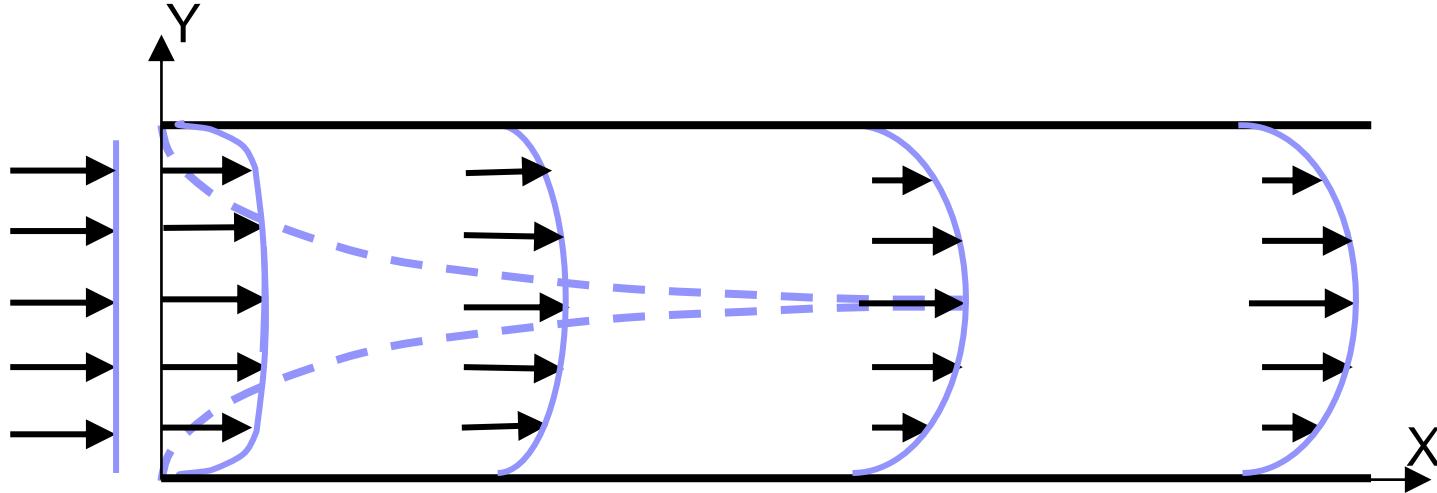
# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

## ■ Cas d'une plaque plane: aspect thermique:



# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

## ■ Cas d'une conduite: écoulement laminaire

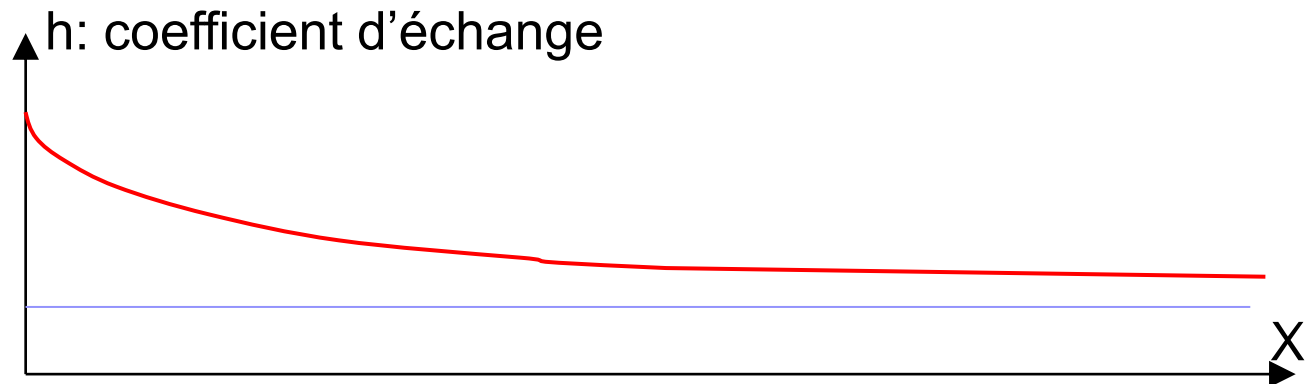
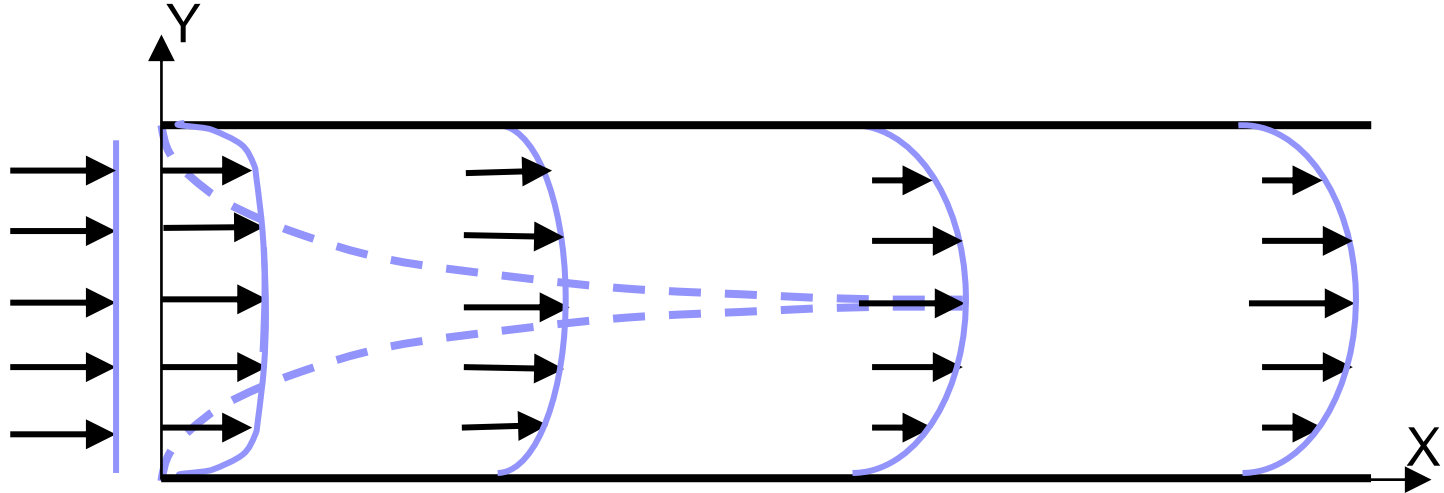


- ☐ Rencontre des couches limites
- ☐ Au delà le profil de vitesse n'évolue plus avec  $X$ , le régime est établi



# LIEN AVEC LA MECANIQUE DES FLUIDES: Couche limite

## ■ Cas d'une conduite: écoulement laminaire



# OBJECTIFS

- Comprendre les mécanismes et la phénoménologie de la convection thermique
- Mettre en place les moyens calculatoires permettant de déterminer les transferts de chaleur

# OBJECTIFS

- Mettre en place les moyens calculatoires permettant de déterminer les transferts de chaleur

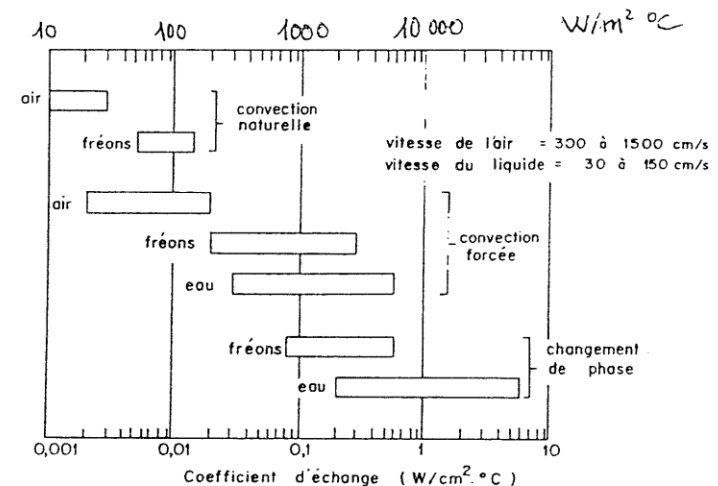
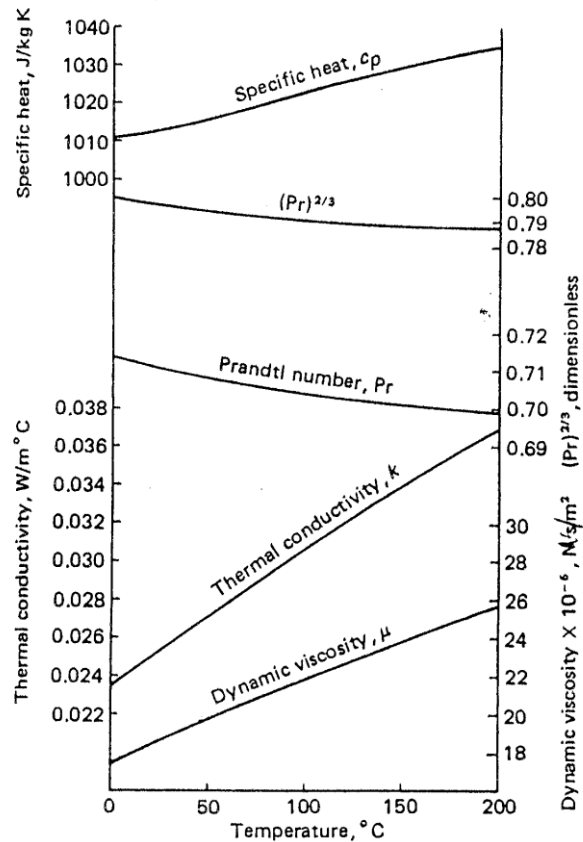
- $\phi = h(T_p - T_{\text{fluide}})$

# ORDRE DE GRANDEUR

métaux liquides	Air	Eau	huiles
$10^{-3}$ $10^{-2}$	1    7    10	100    1000	

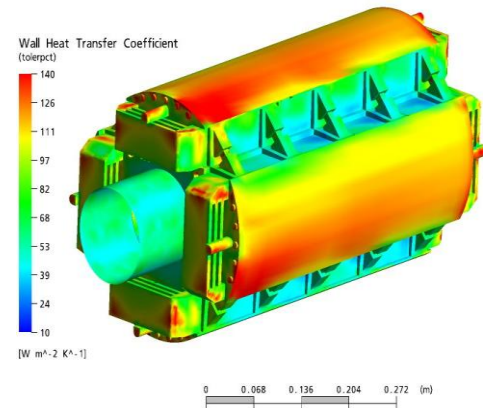
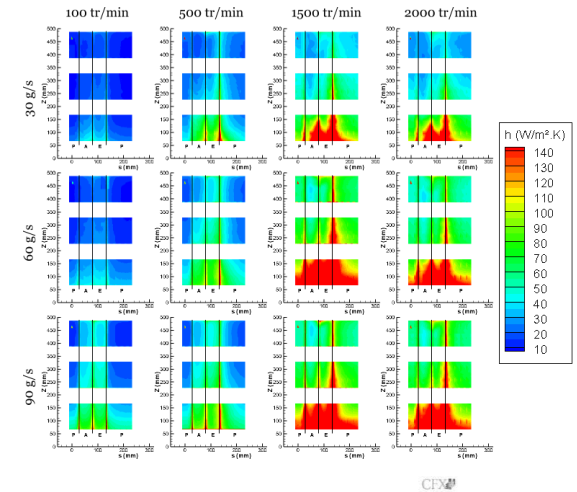
$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu c}{\lambda}$$

Gamme de valeur des nombres de PRANDTL à l'ambiante.



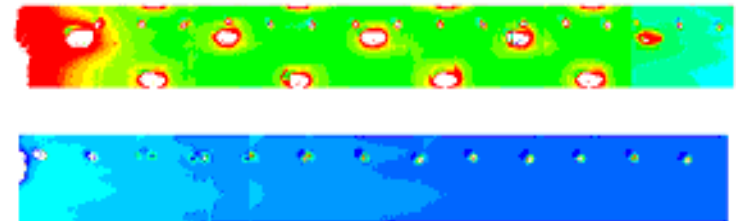
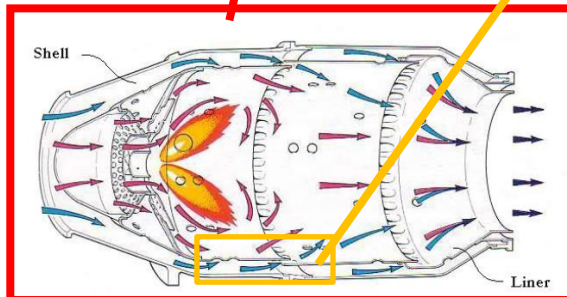
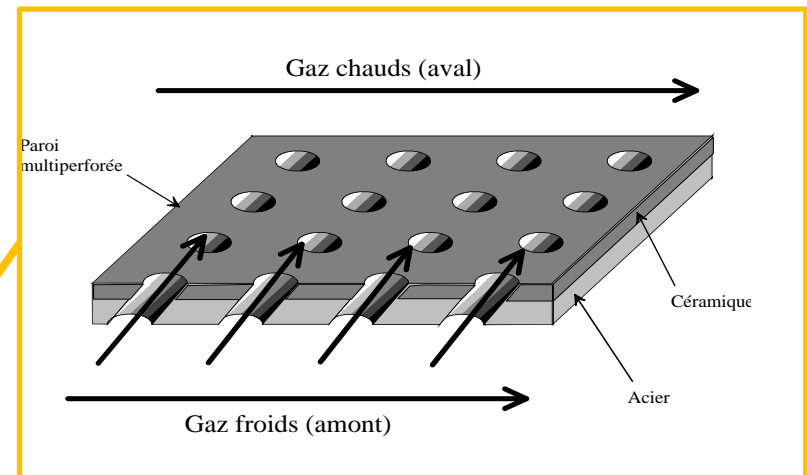
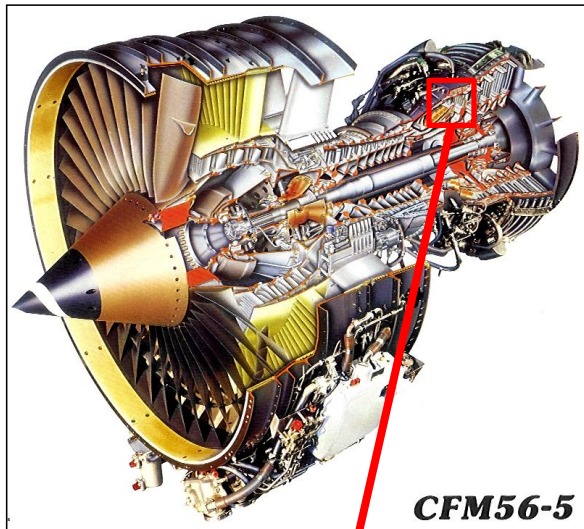
# EXEMPLES

## ■ Moteurs électriques



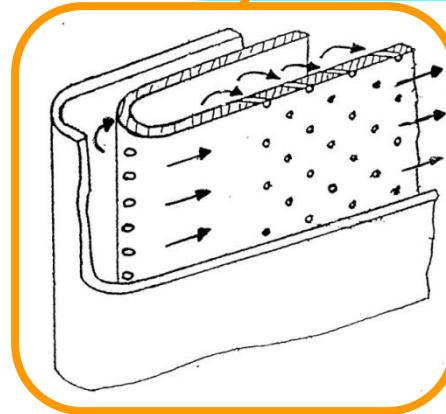
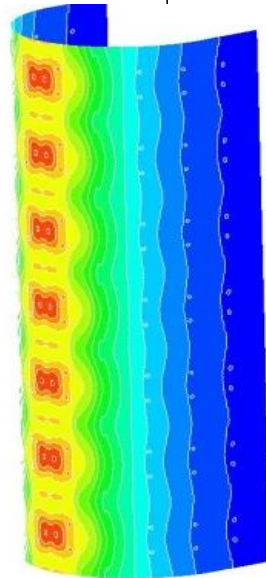
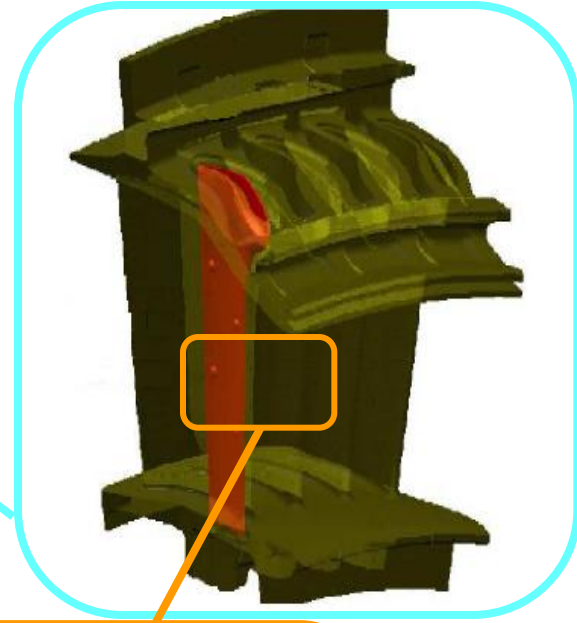
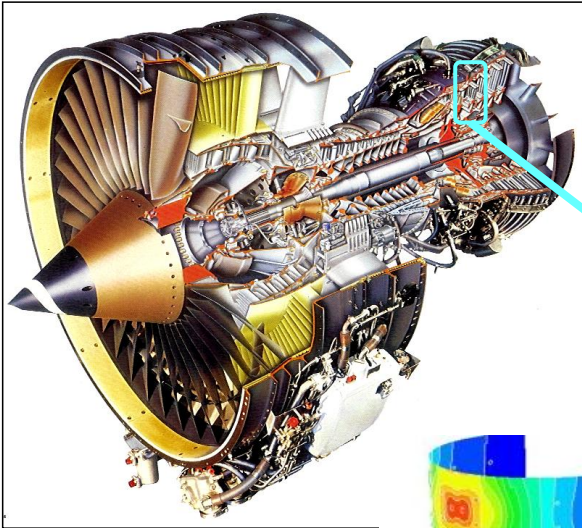
# EXEMPLES

## ■ Turboréacteurs: chambre de combustion



# EXEMPLES

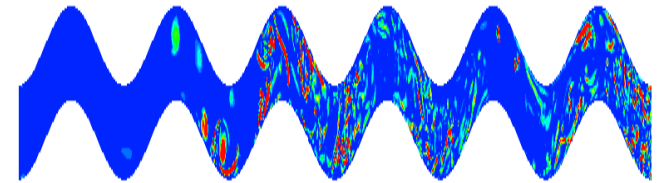
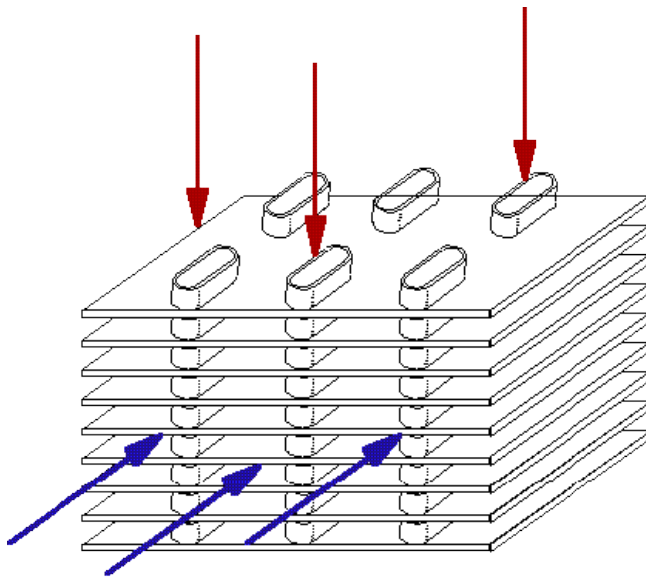
## ■ Turboréacteurs: aubes de turbines



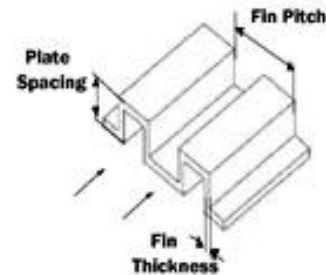


# EXEMPLES

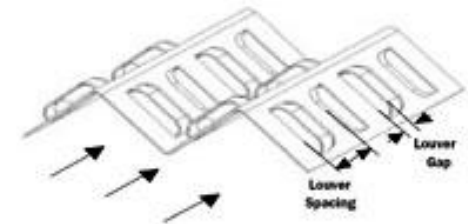
## ■ Echangeurs de chaleur compacts:



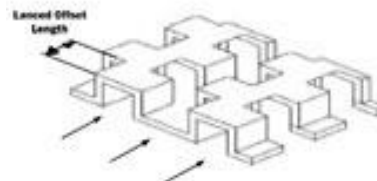
**Plain Fins  
(Straight Fins):**



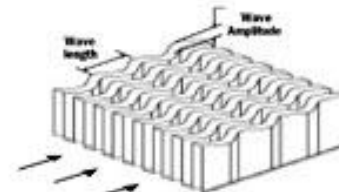
**Louvered Fins:**



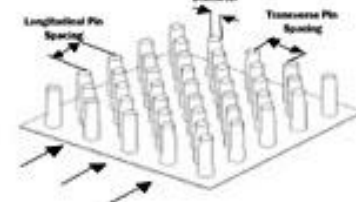
**Strip Fins  
(Lanced Offset):**



**Wavy Fins:**



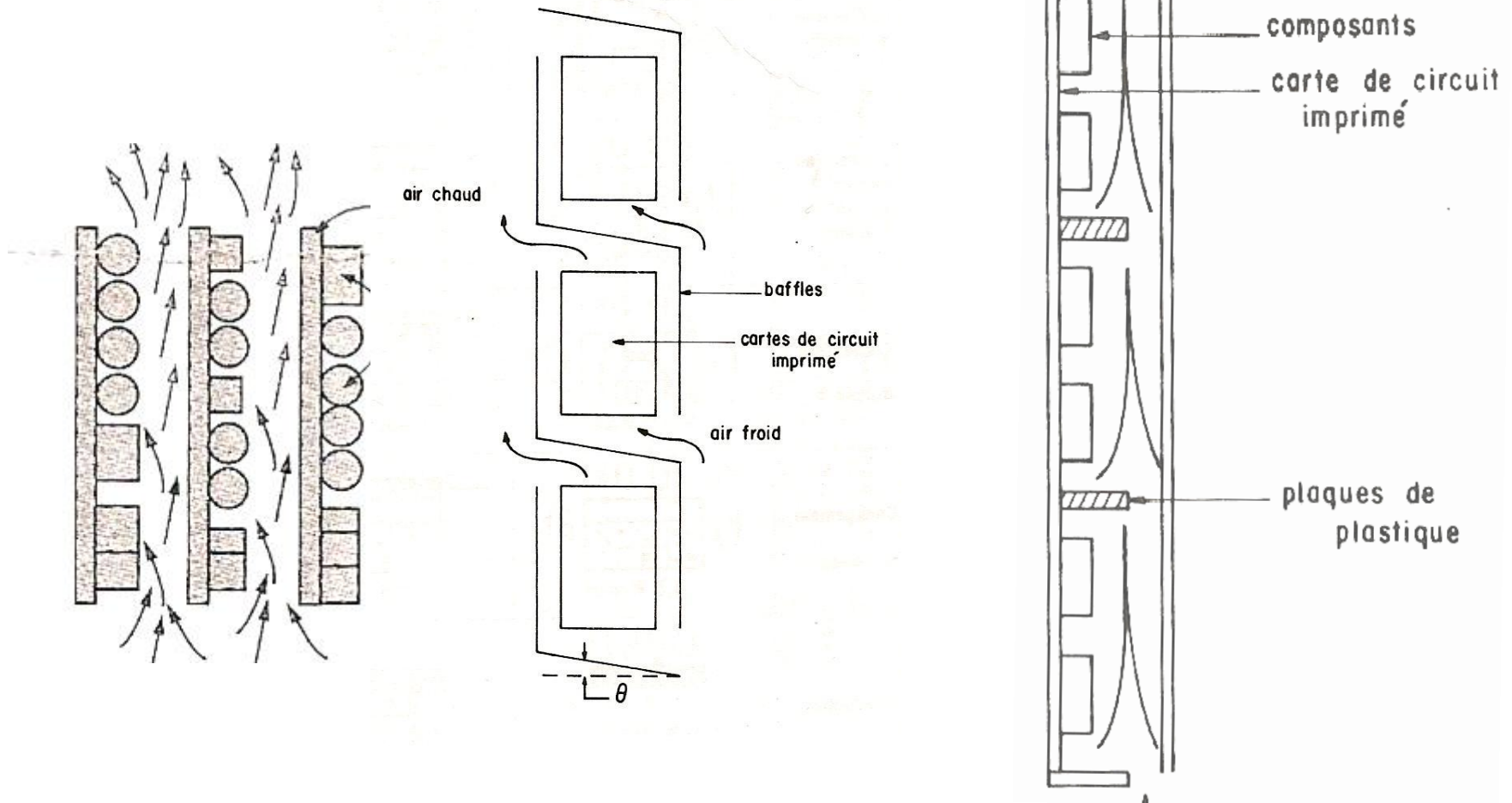
**Pin Fins:**





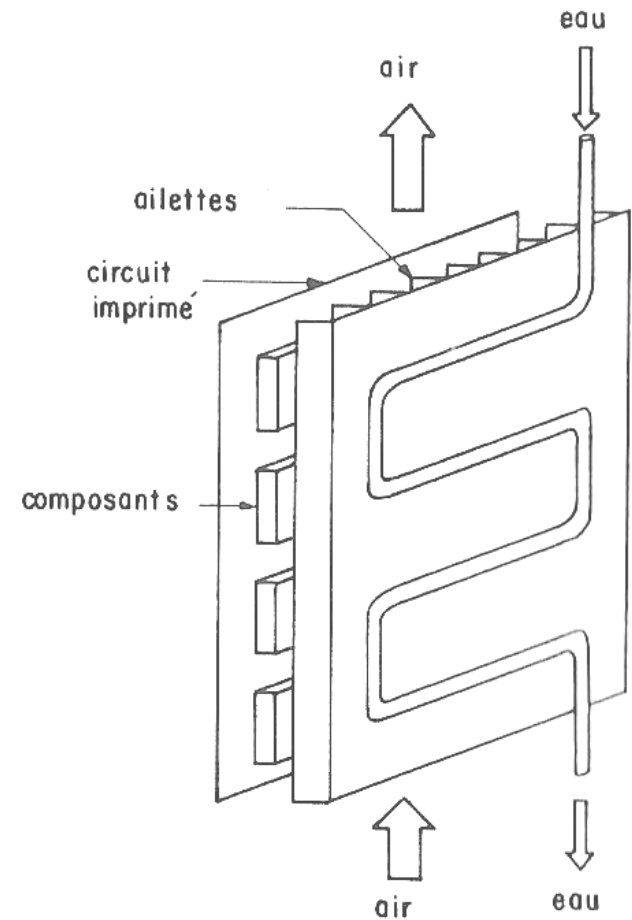
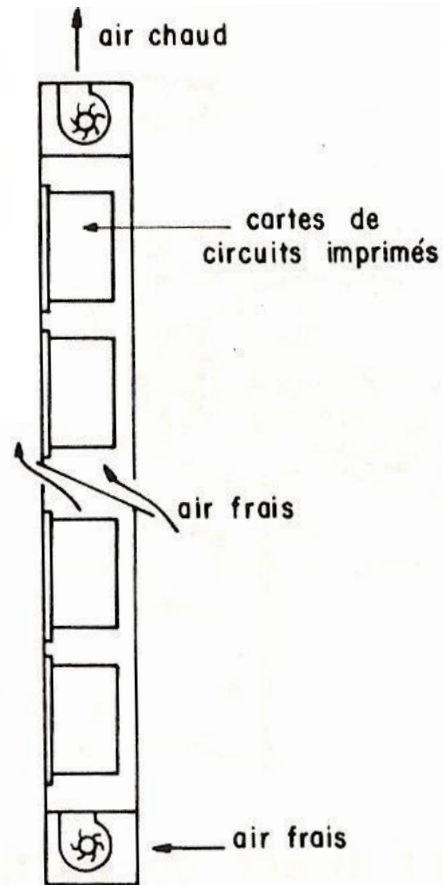
# EXEMPLES

## ■ Electronique: convection naturelle



# EXEMPLES

## ■ Electronique: convection forcée



# EXAMPLES

## ■ Electronique: ébullition

