



Notions de Thermodynamique et Transferts thermiques

Objectifs:

- ✓ Notions fondamentales de la thermodynamique.
- ✓ Bilans thermiques et transferts de la chaleur
- ✓ Introduction à la résolution numérique des problèmes de thermique.

Durée: 32H

Cours MECAVENIR 2010

S.Marié

simon.marie@cnes.fr



Programme

- **Chap 1: 1er et 2nd principe**
 - Énergie interne
 - Quantité de chaleur
 - Loi des gaz parfaits
 - Entropie
- **Chap 2: Systèmes ouverts**
 - Puissance d'une installation
 - Principe de conservation
- **Chap 3: Systèmes minces**
 - Flux de chaleur
 - Bilan énergétique
- **Chap 4: Transferts thermiques**
 - Conduction
 - Convection
 - Rayonnement
- **Chap 5: Notion d'isolation**
 - Les paramètres importants
 - Les différents types d'isolation
 - Quelques matériaux
- **Chap 6: Équation de la chaleur**
 - 1d,2d
 - Éléments pour la résolution numérique (Application Matlab)
 - Application aux ailettes et échangeurs.

Chapitre 1

1er et 2nd Principe

1er Principe

$$dE = dW + dQ.$$

Principe de conservation

2nd Principe

$$\Delta S_{global} = \Delta S_{syst} + \Delta S_{ext} \geq 0$$

Principe d'évolution

I. Rappel sur les gaz

Gaz Parfait

Un gaz parfait est un gaz dont les molécules n'interagissent pas entre elles.

En pratique, c'est vrai si la pression des gaz est suffisamment faible.

I. Rappel sur les gaz

1. Pression dans un fluide:

Point de vue microscopique:

$$p = \frac{1}{3}nmv^2$$

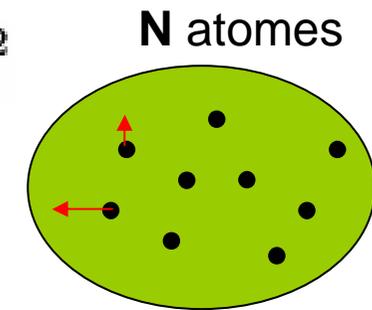
$n = N/V$

Énergie cinétique totale:

$$E = N \frac{1}{2}mv^2$$

La pression est liée aux chocs des molécules du gaz sur une surface.

$$pV = \frac{2}{3}E.$$



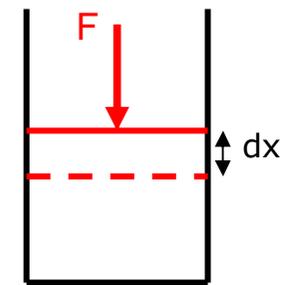
Volume V

Travail exercé par la force F:

$$dW = F(-dx)$$

$$dW = -P_e S dx = -P_e dV.$$

$$P = F/S$$



Pression en Pascal (Pa): ex: Pression atmosphérique = $1,013 \cdot 10^5 Pa$

I. Rappel sur les gaz

2. Température dans un fluide:

N atomes

Définition statistique à partir de la vitesse d'agitation des particules:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$$

La température d'un gaz est liée à la vitesse d'agitation (énergie cinétique) de ses molécules.

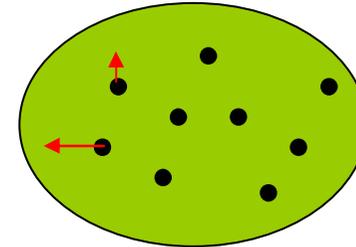
Constante de Boltzmann: $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Cette constante exprime le liens entre énergie et température.

Température en Kelvin (K): $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$



On ne dit pas « degrés Kelvin » !!!!



I. Rappel sur les gaz

3. Loi des gaz parfaits: (Boyle Mariotte)

$$pV = \frac{2}{3}E.$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T$$


$$pV = Nk_B T$$

Nombre
d'Avogadro:

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$N_A k_B = R = 8.317 \text{ J/mol/K}$$

$$pV = n_{\text{mol}} RT$$

Forme réduite: $p = \rho r T$

Pour l'air:

$$r = 287 \text{ J/kg/K}$$

I. Rappel sur les gaz

4. Chaleur Spécifique:

Capacité calorifique à volume constant:

$$C_V = \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_V.$$

Capacité calorifique à pression constante :

$$C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P.$$

Enthalpie (en **Joules**):

$$H = E + PV.$$

Relations fondamentales:

$$\gamma = C_p / C_v$$

$$C_p - C_V = n_{mol} R$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_V = \frac{n_{mol} R}{\gamma - 1} \\ C_P = \frac{\gamma n_{mol} R}{\gamma - 1} \end{array} \right.$$

I. Rappel sur les gaz

Expressions massique : $C_V = \int \rho c_v dv$ et $C_P = \int \rho c_p dv$.

$$E = \int \rho e dv$$

Relations réduites:

$$c_p = \frac{\gamma r}{\gamma - 1}, \quad c_v = \frac{r}{\gamma - 1}$$

Relations réduites (2):

$$\begin{aligned} de &= c_v(T) dT, \\ dh &= c_p(T) dT \end{aligned}$$

I. Rappel sur les gaz

Quelques valeurs de c_p à 300 K:

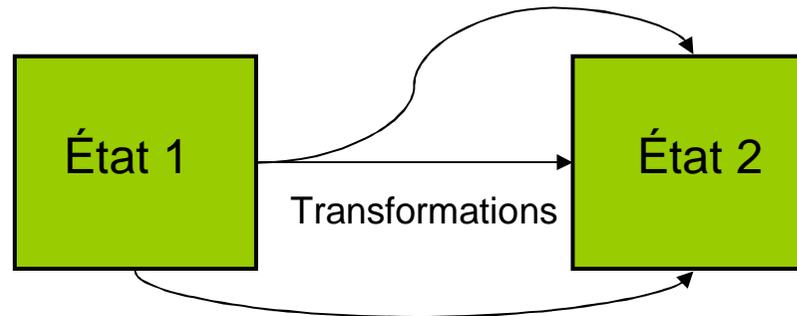
corps	c_p J/kg/K	ρ kg/m ³
Alu	903	2702
brique	835	1900
Acier	480	8000
Fer	447	7870
cuivre	380	8933
glace	2.0	920
chêne	1.3	720

corps	$c_p 10^{-3}$ J/kg/K	ρ kg/m ³
air (250 K)	1.006	1.39
air (300K)	1.007	1.16
NH ₃ (300K)	2.158	0.69
He(300K)	5.193	0.16
O ₂ (300K)	0.92	1.28
H ₂ -Ovap(380K)	2.06	0.58

corps	$c_p 10^{-3}$ J/kg/K	ρ kg/m ³
eau	4.18	1000
fréon	0.97	1.3
huiles moteur	1.9	800

II. Premier Principe

1. Énergie interne



L'énergie interne E est une variable d'état définie par le **premier principe** de la thermodynamique:

$$E_2 - E_1 = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2}$$

Soit, sous forme infinitésimale:

Expression du premier principe pour les systèmes fermés

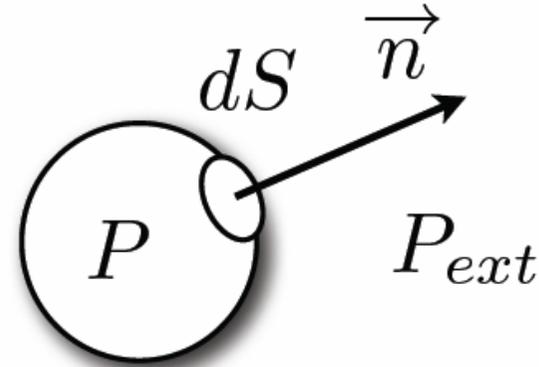
$$dE = \delta Q + \delta W$$

II. Premier Principe

2. Exemple de travaux

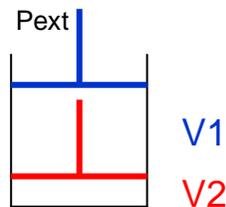
$$dW = \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{\ell}$$

$$dW = -P_{ext} dS \vec{n} \cdot d\vec{\ell} = -P_{ext} dV$$



Compression à pression constante:

$$W_{1 \rightarrow 2} = -P_{ext}(V_2 - V_1)$$



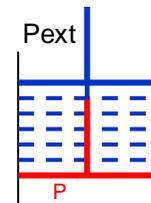
Compression quasistatique:

On s'arrange pour que $P_{ext}=P$ à chaque instant et $T=cste$

$$dW = -PdV$$

$$dW = -n_{mol}RT_1 \frac{dV}{V}$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = -n_{mol}RT_1 \text{Log}(V_2/V_1)$$



II. Premier Principe

3. Chaleur échangée

$$\begin{cases} dQ = C_v dT + l dV \\ dQ = C_p dT + h dP \end{cases}$$

Dans le cas d'un gaz parfait:

$l=p$ (Pa)

Coefficient de chaleur Latente de dilatation.

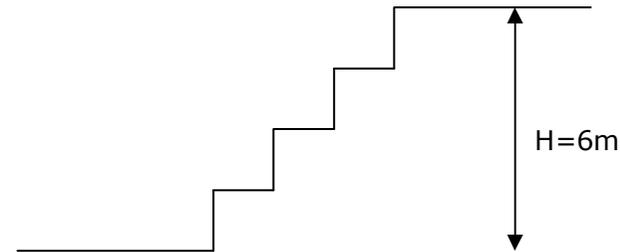
$h=-v$ (volume)

Coefficient de chaleur Latente de compression.

II. Premier Principe

4. Application très simple

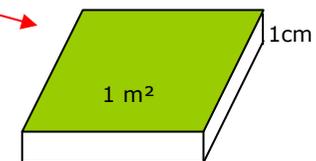
Marty (70kg) monte des escaliers, haut de 6m. En supposant qu'il ne transpire pas (pas d'échange de chaleur), combien d'énergie a-t-il dépensé ? Exprimer en calories (1 cal = 4.184 J car référence par rapport au cp de l'eau)



A titre indicatif, 100g de frites = 420 000 cal !!

Une plaque de cuivre reste au soleil pendant 5 min. Déterminer la variation de température de la plaque.

1 kJ /s/m²



cp=380 J/Kg/K

rho=8933 kg/m³

III. Second Principe

1. Entropie

L'entropie est une fonction d'état extensive mesurant le « désordre » d'un système.

Second principe:

$$\Delta S_{syst} = \Delta S_{\text{échange}} + S_{\text{création}}$$

$$\Delta S_{\text{échange}} = \frac{\Delta Q}{T} \quad S_{\text{création}} \geq 0$$

Point de vue statistique: Formule de Boltzmann.

$$S = k_B \ln \Omega$$

III. Second Principe

Cas des gaz en compression:

$$TdS = dE + PdV$$

Cas général:

$$TdS = dE - dW_{rev}$$

2. Transformations réversibles

En utilisant le premier principe, on arrive à :

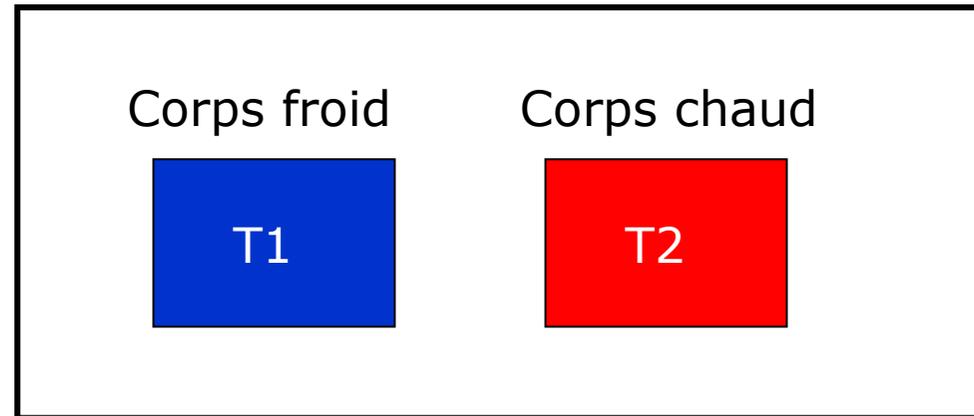
$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

Dans le cas d'une transformation **isentropique** (=réversible + adiabatique), on retrouve les lois de Laplace:

$$\begin{cases} PV^\gamma = cste \\ TV^{\gamma-1} = cste \end{cases}$$

III. Second Principe

A quoi sert le second principe ?



Système isolé sans travail

Le premier principe appliqué au système nous dit simplement: $dQ_1 + dQ_2 = 0$

Le second principe nous donne : $dS = \frac{dQ_1}{T_1} + \frac{dQ_2}{T_2} \geq 0$ Soit: $dQ_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \geq 0$

Cela ne suffit pas à déterminer quel corps va gagner de la chaleur et quel corps va en céder !!!!

C'est bien le corps froid qui gagne de la chaleur et le corps chaud qui en donne... !! (Ouf !!)

Le second principe détermine le sens des échanges de chaleur.

III. Second Principe

3. Machines Thermiques

Principe du moteur à explosion

- ❑ 1er temps: Admission. Le mélange air + essence entre dans le piston: le volume augmente.
- ❑ 2eme temps: Compression isentropique par le piston.
- ❑ 3eme temps: Explosion. Augmentation isochore de la température. Puis refroidissement adiabatique (détente).
- ❑ 4eme temps: Échappement. La soupape s'ouvre, détente isochore des gaz brûlés.

III. Second Principe

3. Machines Thermiques

Rendement de l'installation: $r = -W/Q_{recue}$

Application du premier principe sur tout le cycle: $W_{cycle} + Q = 0$

Donc on a: $W_{cycle} = -Q = -(Q_{2-3} + Q_{4-1})$

$$\text{D'où: } \left. \begin{aligned} r &= \frac{(Q_{2-3} + Q_{4-1})}{Q_{2-3}} = 1 + \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} & \left. \begin{aligned} Q_{2-3} &= C_V(T_3 - T_2) \\ Q_{4-1} &= C_V(T_1 - T_4) \end{aligned} \right\} r &= 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \end{aligned} \right.$$

De 1 à 2: compression isentropique, on peut utiliser les lois de Laplace: $TV^{\gamma-1} = cste$

De 3 à 4: détente adiabatique (en supposant réversible) donc Laplace aussi !

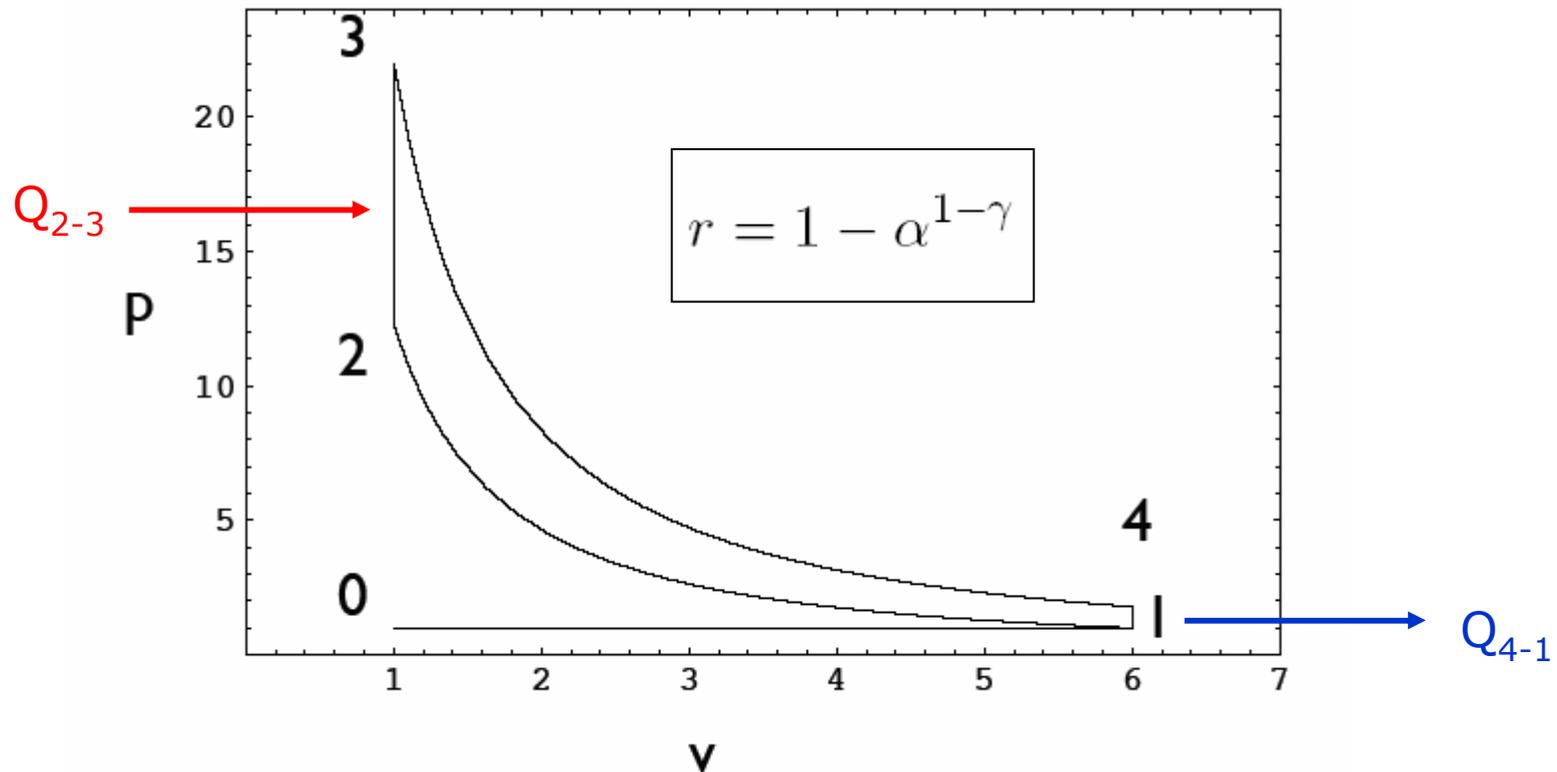
$$\left. \begin{aligned} T_2/T_1 &= (V_1/V_2)^{(\gamma-1)} \\ T_3/T_4 &= (V_1/V_2)^{(\gamma-1)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_4 - T_1 = \frac{T_1}{T_2}(T_3 - T_2) \quad \alpha = V_1/V_2$$

$$r = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$$

III. Second Principe

3. Machines Thermiques

Principe du moteur à explosion



AN: avec $\alpha=6$ on a $r=51\%$ environ

Chapitre 2

Systemes ouverts

Systemes qui échangent de la masse avec l'extérieur.

Principe de base à connaître et à comprendre !!!

$$\begin{aligned} & \text{Variation temporelle totale} \\ & = \\ & \text{(Ce qui rentre - Ce qui sort) des surfaces} \\ & + \\ & \text{création intérieure volumique} \end{aligned}$$



I. Lois de conservation

1. Conservation de la Masse

Hypothèse des régimes permanents:

$$\frac{dm}{dt} = 0$$



$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt}$$

$$\frac{dm_\Omega}{dt} = \frac{dm_1}{dt} - \frac{dm_2}{dt}$$



I. Lois de conservation

2. Energie

$$\text{variation temporelle totale} = \frac{dE_{\Omega}}{dt}$$

Il faut évaluer: (Ce qui rentre – Ce qui sort) des surfaces

$$\text{Variation d'énergie cinétique: } \frac{dm_1}{dt} \left(\frac{1}{2} v_1^2 \right) - \frac{dm_2}{dt} \left(\frac{1}{2} v_2^2 \right)$$

$$\text{Variation d'énergie potentielle: } \frac{dm_1}{dt} g z_1 - \frac{dm_2}{dt} g z_2$$

$$\text{Variation d'énergie interne: } \frac{dm_1}{dt} e_1 - \frac{dm_2}{dt} e_2$$



I. Lois de conservation

De plus, on doit prendre en compte le travail extérieur exercé par l'arrivée du fluide:

$$dW = p_1 S_1 dx_1 = p_1 dV_1$$



$$\frac{dW_1}{dt} = p_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{p_1}{\rho_1} \frac{dm_1}{dt}$$

$$\frac{dW_2}{dt} = -\frac{p_2}{\rho_2} \frac{dm_2}{dt}$$

D'où, en utilisant l'enthalpie massique « h »: $h_1 = e_1 + \frac{p_1}{\rho_1}$

$$(\text{ce qui rentre} - \text{ce qui sort}) \text{ des surfaces} = \left(\frac{1}{2}v_1^2 + gz_1 + h_1\right) \frac{dm_1}{dt} - \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gz_2 + h_2\right) \frac{dm_2}{dt}$$

I. Lois de conservation

Terme de (création intérieure volumique)

$$\frac{dQ}{dt}$$

Création de chaleur interne (source, réaction chimique, nucléaire...) + Échange de chaleur avec l'extérieur (positif ou négatif)

$$\frac{dW}{dt}$$

Travail interne (pompe, force de frottements...)



Ces termes peuvent aussi intervenir dans la partie

**(Ce qui rentre – Ce qui sort)
des surfaces**

I. Lois de conservation

Bilan total:

Expression générale du premier principe.

$$\frac{dE_{\Omega}}{dt} = \left(\frac{1}{2}v_1^2 + gz_1 + h_1\right)\frac{dm_1}{dt} - \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gz_2 + h_2\right)\frac{dm_2}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt}.$$

Cas des régimes permanents
(pas d'accumulation
d'énergie):

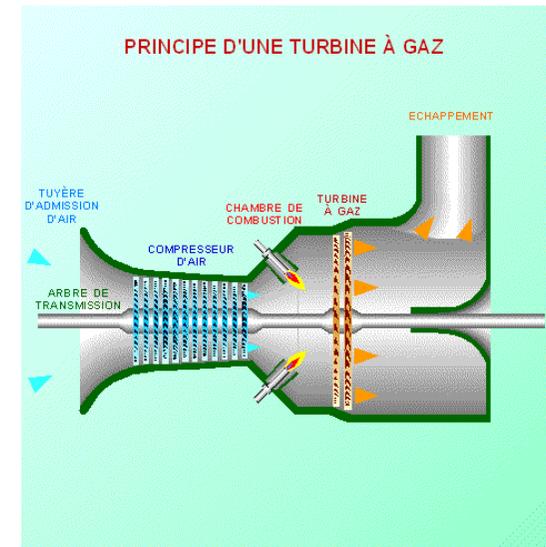
$$\left\{ \begin{array}{l} dE_{\Omega} = 0, \\ \frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt} = \frac{dm}{dt} \end{array} \right.$$

$$0 = \left(\left(\frac{1}{2}v_1^2 + gz_1 + h_1\right) - \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gz_2 + h_2\right)\right)\frac{dm}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt}.$$

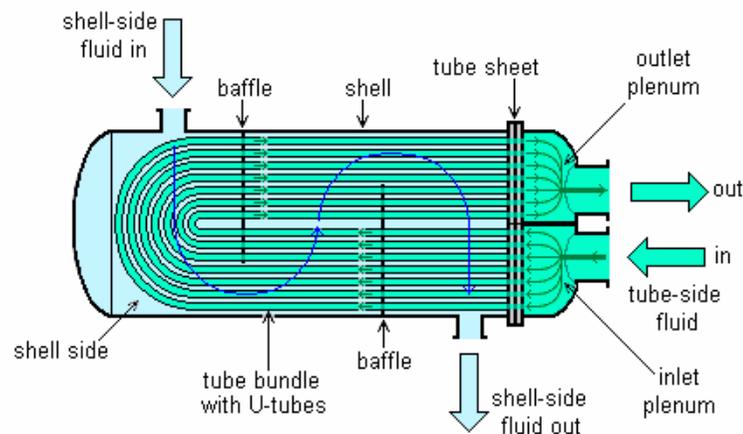
II. Applications

Puissance d'une turbine à gaz:

$$P = -\frac{dW}{dt} = \left(\frac{1}{2}v_1^2 + h_1\right)\frac{dm}{dt} - \left(\frac{1}{2}v_2^2 + h_2\right)\frac{dm}{dt} + \frac{dQ}{dt}$$



U-tube heat exchanger



Échangeurs (radiateurs, condenseur, évaporateurs):

$$0 = (h_1 - h_2)\frac{dm}{dt} + \frac{dQ}{dt}$$

II. Applications

Ordre de Grandeur des puissances de quelques systèmes ouverts:

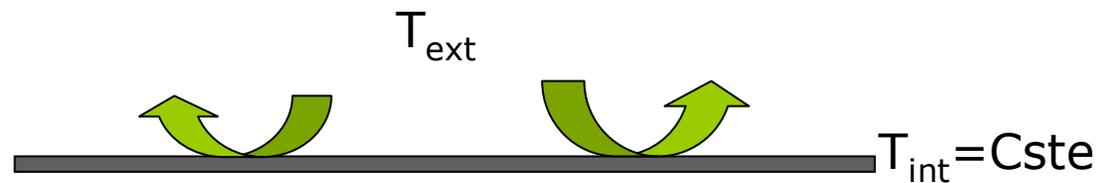


- Homme: 100 W
- Cheval: 735 W
- Voiture: 75 kW (~ 100 ch)
- Lumière du soleil: 1kW /m²
- Champ d'éolienne: 600 kW
- TGV: 6MW
- Avion: 25 MW
- Centrale Hydraulique: 400 MW
- Centrale Nucléaire: 900 MW / Réacteur
- Concorde à Mach 2: 2400 MW
- Ariane 5 au décollage: 5 GW

Chapitre 3

Systemes minces

Systemes dont les dimensions sont suffisamment faibles pour considérer la température intérieure comme uniforme. (Elle ne dépend que du temps)



Lié au phénomène de transfert de la chaleur

$$\begin{aligned} & \text{Variation temporelle totale} \\ & = \\ & \text{(Ce qui rentre - Ce qui sort) des surfaces} \\ & + \\ & \text{création intérieure volumique} \end{aligned}$$

Variation temporelle du flux de chaleur

Si elle n'engendre pas de variation spatiale de Température intérieure

I. Forme générale

En Physique, on exprime souvent les lois de conservation sous la forme:

$$\frac{d}{dt} \iiint a dv = - \oiint \vec{J} \cdot d\vec{s} + \iiint \varphi_a dv$$

Systemes minces sans
création volumique

Variation temporelle totale = Termes de Flux + Création volumique

En thermique on a:

$$\begin{array}{ccc} \vec{J} & \longrightarrow & \vec{q} \\ a & \longrightarrow & \rho e \end{array}$$

Grâce au premier principe et en supposant que le système global ne travaille pas, on peut écrire:

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho e dv = \frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q} \quad \text{D'où:}$$

$$\frac{dQ}{dt} = - \iint \vec{q} \cdot d\vec{s}$$

II. Flux de Chaleur

$$\frac{dQ}{dt} = - \iint \vec{q} \cdot d\vec{s}$$

Différent mécanisme de transferts de chaleur = différentes expressions de q

- **Conduction:** Propagation de la chaleur de proche en proche par l'intermédiaire des chocs entre particules. Le flux exprimant ce phénomène est donné par la loi de **Fourier**:

$$\vec{q}_{cond} = -\lambda \overrightarrow{grad} T$$

- **Convection:** Propagation de la chaleur par le fluide (macro-mouvement).
Convection forcée: présence d'un écoulement initial.
Convection naturelle: L'écoulement est crée par différence de densité (ex: air chaud plus léger remonte).

Le flux est donné par la loi de **Newton**:

$$\vec{q}_{conv} = h(T_w - T_e) \vec{n}$$

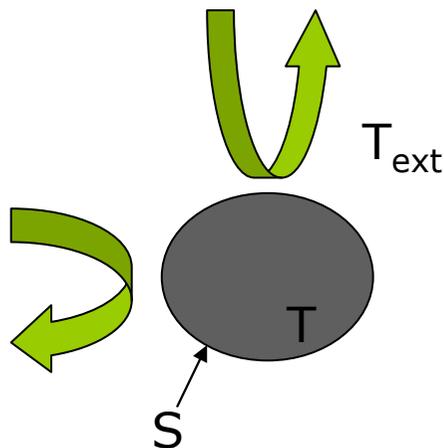
- **Rayonnement:** Un corps émet de la chaleur par rayonnement. Le flux est donné par la loi de **Stephan-Boltzmann**:

$$\vec{q}_{ray} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_e^4) \vec{n}$$

II. Flux de Chaleur

$$\frac{dQ}{dt} = - \iint \vec{q} \cdot d\vec{s}$$

Dans ce chapitre, on considérera uniquement des **transferts par convection** dans des systèmes minces. Ainsi la température de surface du corps (T_w) sera prise uniforme et égale à la température global du corps considéré (T).



Bilan global devient:

$$\frac{dQ}{dt} = - \iint \vec{q} \cdot d\vec{s} = -h(T - T_e)S$$

Par définition on a:

$$\dot{Q} = mc_p \frac{dT}{dt} = \rho c_p V \frac{dT}{dt}$$

$$\dot{Q} = -h(T - T_e)S,$$

h : $\text{W/m}^2/\text{K}$ coefficient de transfert thermique par convection

Équation des systèmes minces

Donc:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = -h(T - T_e)S$$

II. Flux de Chaleur

La "gamme des valeurs" de h ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) est :

convection libre (air)	5-25
convection libre (eau)	100-900
convection forcée (air)	10-500
convection forcée (eau)	100-15000
convection forcée (huile)	50-2000
conv. f. (métaux fondus)	6000-120000
eau bouillante	2500-25000
vapeur d'eau se condensant	50000-100000
rayonnement (linéarisé a 300K)	1

Formulaire 1ere Partie

Les formules importantes de cette première partie:

1

Loi des gaz parfaits:

$$pV = n_{mol}RT$$

Définition de c_p et c_v :

$$\begin{aligned} de &= c_v(T)dT \\ dh &= c_p(T)dT \end{aligned}$$

2

1er Principe

$$dE = \delta Q + \delta W$$

Relation Entropie-Energie interne

$$TdS = dE + PdV$$

3

Transformation isentropique (=réversible + adiabatique), Loi de Laplace: $PV^\gamma = cste$

4

Expression générale du premier principe.

$$\frac{dE_\Omega}{dt} = \left(\frac{1}{2}v_1^2 + gz_1 + h_1\right)\frac{dm_1}{dt} - \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gz_2 + h_2\right)\frac{dm_2}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt}.$$

5

Équation des systèmes minces

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = -h(T - T_e)S$$