3. BILANS MACROSCOPIQUES

3.1. Définition d'un système fermé pour les bilans macroscopiques	
Système ouvert, système fermé.	Définir un système fermé approprié pour réaliser un bilan de grandeur extensive.
3.2. Bilans d'énergie	
Bilans thermodynamiques.	Exprimer les principes de la thermodynamique pour un écoulement stationnaire sous la forme : $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_u + q$; $\Delta s = s_e + s_c$ Etudier des propriétés des machines thermodynamiques réelles à l'aide des diagrammes (P, h) d'une machine thermique
Modèle de l'écoulement parfait : adiabatique, réversible, non visqueux. Relation de Bernoulli. Effet Venturi.	Utiliser le modèle de l'écoulement parfait pour un écoulement à haut Reynolds en dehors de la couche limite. Citer et appliquer la relation de Bernoulli à un écoulement parfait, stationnaire, incompressible et homogène. Décrire l'effet Venturi.
Bilan macroscopique d'énergie mécanique.	Effectuer un bilan d'énergie sur une installation industrielle. Utiliser le fait admis que la puissance des actions intérieures est nulle pour un écoulement parfait et incompressible.
3.3. Bilans de quantité de mouvement et de moment cinétique	
Loi de la quantité de mouvement pour un système fermé.	Faire l'inventaire des forces extérieures. Effectuer un bilan de quantité de mouvement.
Loi du moment cinétique pour un système fermé.	Effectuer un bilan de moment cinétique

Révisions de première année :

Thème 2 : mouvements et interactions (2)

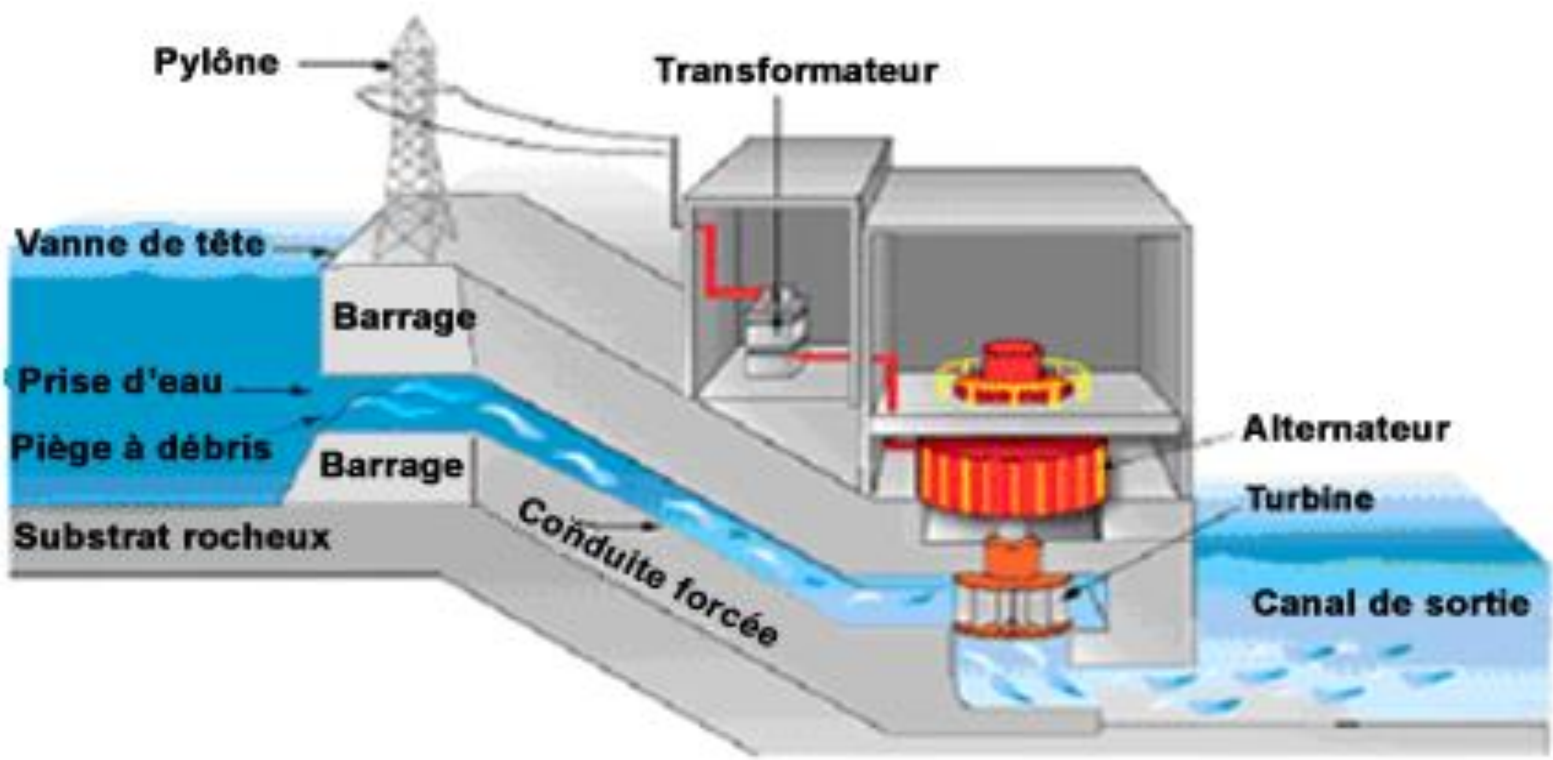
Notions et contenus	Capacités exigibles
2.5. Moment cinétique	
Moment cinétique d'un point matériel par rapport à un point et par rapport à un axe orienté.	Relier la direction et le sens du vecteur moment cinétique aux caractéristiques du mouvement.
Moment cinétique d'un système discret de points par rapport à un axe orienté.	Utiliser le caractère algébrique du moment cinétique scalaire.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté.	Exprimer le moment d'une force par rapport à un axe orienté en utilisant le bras de levier.
Théorème du moment cinétique en un point fixe dans un référentiel galiléen. Conservation du moment cinétique.	Identifier les cas de conservation du moment cinétique.
2.7. Mouvement d'un solide	
Description du mouvement d'un solide dans deux cas particuliers	
Définition d'un solide.	Différencier un solide d'un système déformable.
Translation.	Reconnaître et décrire une translation rectiligne ainsiqu'une translation circulaire.
Rotation autour d'un axe fixe.	Décrire la trajectoire d'un point quelconque du solide et exprimer sa vitesse en fonction de sa distance à l'axe et de la vitesse angulaire.

Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide mobile autour d’un axefixe	
Moment cinétique d’un solide en rotation autour d’un axe : moment d’inertie.	Exploiter, pour un solide, la relation entre le moment cinétique scalaire, la vitesse angulaire de rotation et le moment d’inertie fourni. Relier qualitativement le moment d’inertie à la répartition des masses.
Théorème scalaire du moment cinétique appliqué au solide en rotation autour d’un axe fixe dans un référentiel galiléen.	Exploiter le théorème scalaire du moment cinétiqueappliqué au solide en rotation autour d’un axe fixe dans un référentiel galiléen
Thème 3 : l’énergie : conversions et transferts	

3.5. Machines thermiques	
Application du premier principe et du deuxième principe de la thermodynamique aux machines thermiques cycliques dithermes : rendement, efficacité, théorème de Carnot.	Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme. Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme. Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d’un cycle. Justifier et utiliser le théorème de Carnot. Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles. Expliquer le principe de la cogénération **Mettre en œuvre une machine thermique cyclique ditherme.**

I. Bilans d'énergie

1. Principe d'un bilan sur un système fermé



2. Bilan de masse : équation globale de conservation de la masse

3. Bilan d'énergie, cas de l'écoulement stationnaire

II. Bilans d'énergie mécanique pour un fluide en écoulement stationnaire

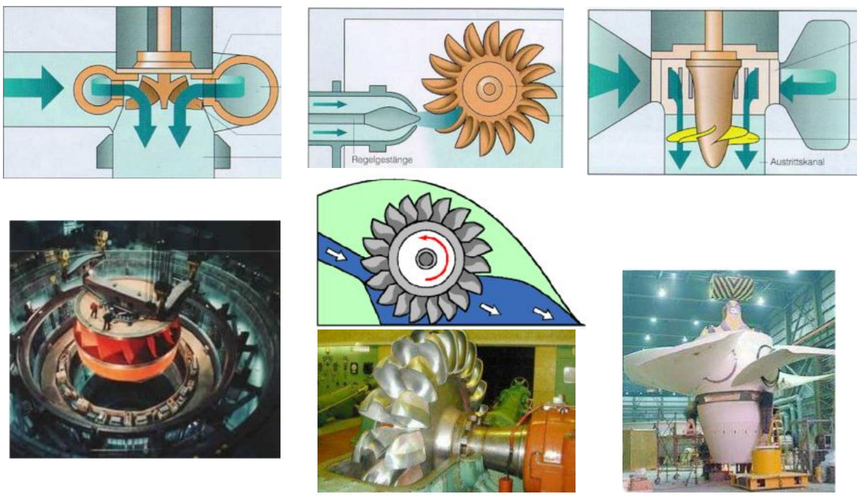
1. Expression du bilan : théorème de l'énergie mécanique

2. Puissance des forces de pression

3. Bilan d’énergie mécanique sur une installation industrielle (pompe ou turbine)

Sachant que le débit volumique du jet est de 500 L.s^{-1} et que la puissance de la pompe qui alimente le jet est de 1 MW, déterminer la hauteur du jet d’eau.

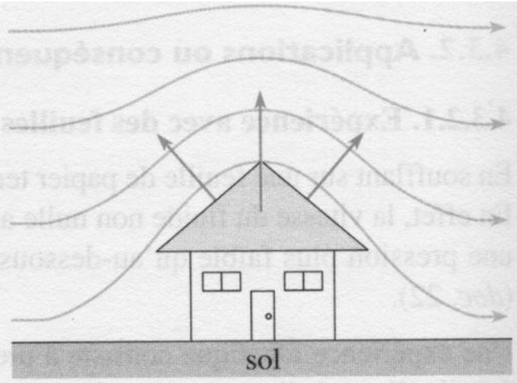
Puissance maximale disponible sur une turbine



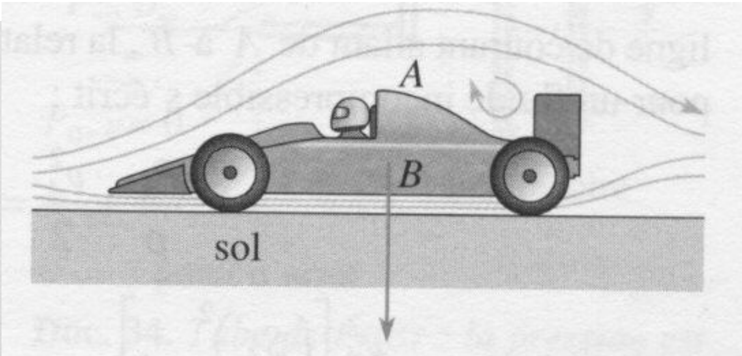
	FRANCIS	*PELTON*	*KAPLAN*
Utilisation	Retenue d’eau	Retenue d’eau	Au fil de l’eau
Hauteur de chute [m]	10 - 700	200 - 2000	0 - 30
Débit	4 - 55 m^3/s	4 - 15 m^3/s	4 - 350 m^3/s
Efficacité	~ 90%	90 - 95 %	80-95%

4. **Cas de l’écoulement parfait : relation de Bernoulli**
5. **Applications, effet Venturi**

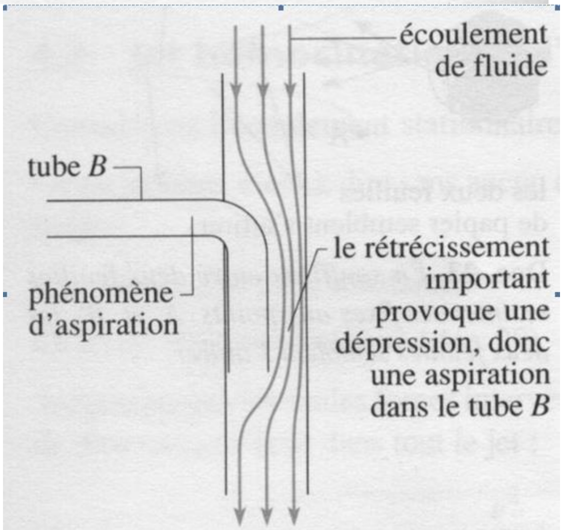
Quelques exemples de l'effet Venturi…



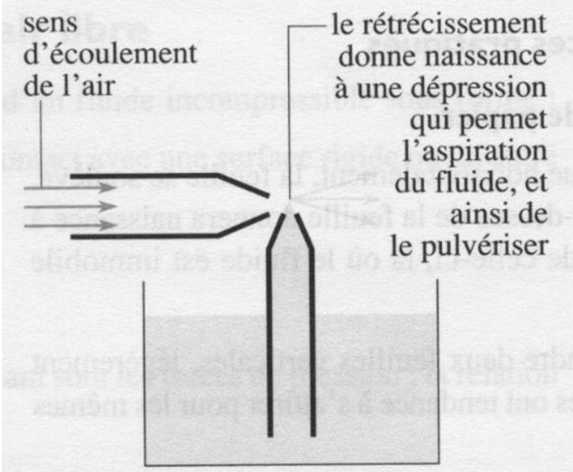
Doc. 30. *Les lignes de courant au voisinage d'un toit sont plus « serrées ». La pression sur le toit est plus faible que la pression à l'intérieur de la maison.*



Doc. 25. *Effet de sol pour un véhicule de compétition :* $P_A > P_B$.

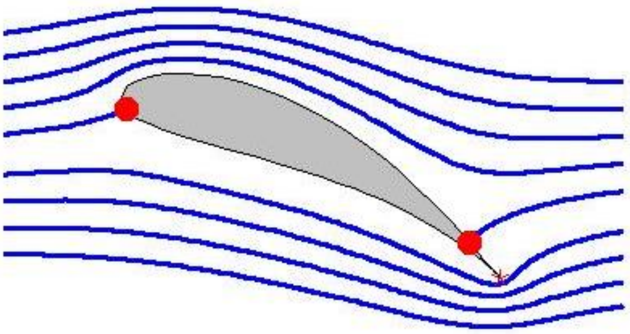


Doc. 28. *Principe de la trompe à eau.*

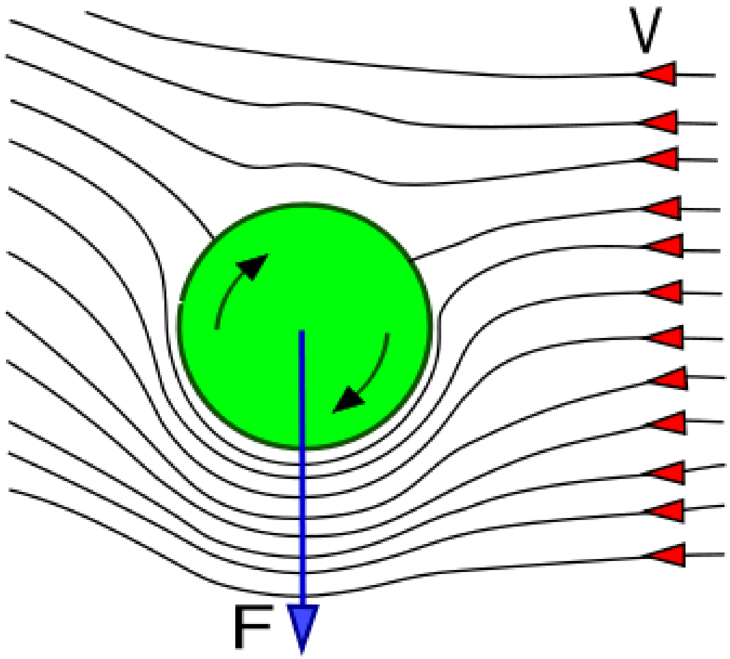


Doc. 29. *Principe de fonctionnement d'un vaporisateur, ou d'un pistolet à peinture.*

Portance :



Effet magnus

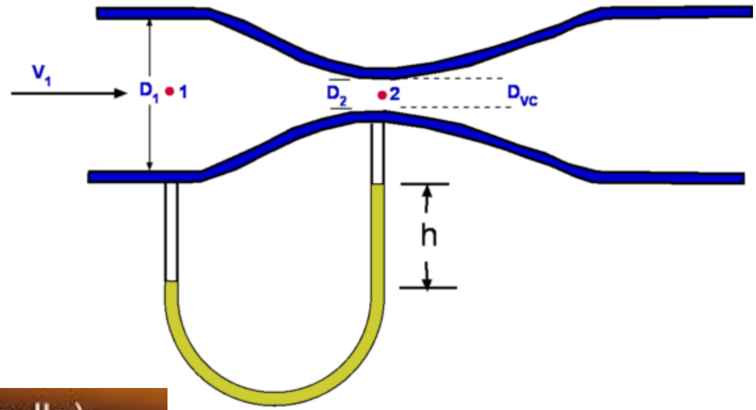


L'**effet Magnus**, découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), physicien allemand, permet notamment d'expliquer les effets de balle dans le sport, le fonctionnement de certains modes de propulsion ainsi que le phénomène de portance (portance des ailes d'avion par exemple).Lorsqu'une balle en rotation se déplace dans l'air, elle va par frottement modifier la vitesse du courant d'air autour d'elle. L'effet sera dissymétrique : d'un côté la balle entraîne l'air qui accélère. De ce côté la pression diminue. De l'autre côté la balle freine l'écoulement d'air et la pression augmente. On aura donc une différence de pression et la balle va se déplacer du côté où la pression est plus faible. Selon la vitesse de rotation de la balle, la position des points où la vitesse est respectivement minimale et maximale (et donc le sens de la force appliquée) varie. Cependant, on peut dire qu'en gros et par exemple, pour une rotation d'arrière en avant (axe horizontal perpendiculaire au mouvement, comme une balle roulant sur le sol), la balle plongera plus vite vers le sol. Dans le sens contraire, elle sera soulevée et aura une trajectoire plus plate, elle volera plus loin avant de toucher le sol.

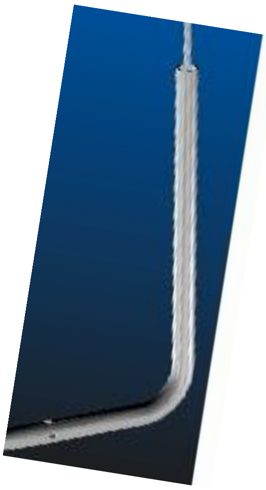
C'est cet effet qui explique par exemple la trajectoire travaillée des tirs de coups-francs au football, l'effet *lifté* au tennis ou l'effet de *rotation* d'une balle de tennis de table.

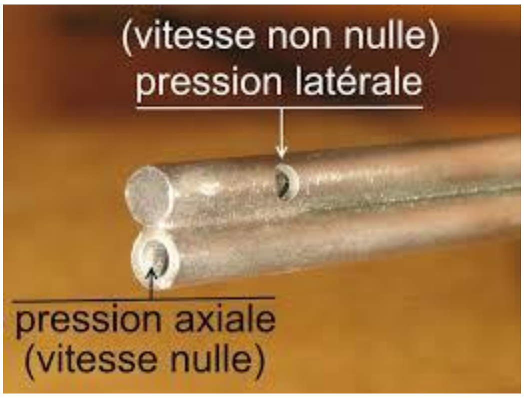
Mesure d'un débit avec une jauge de Venturi :

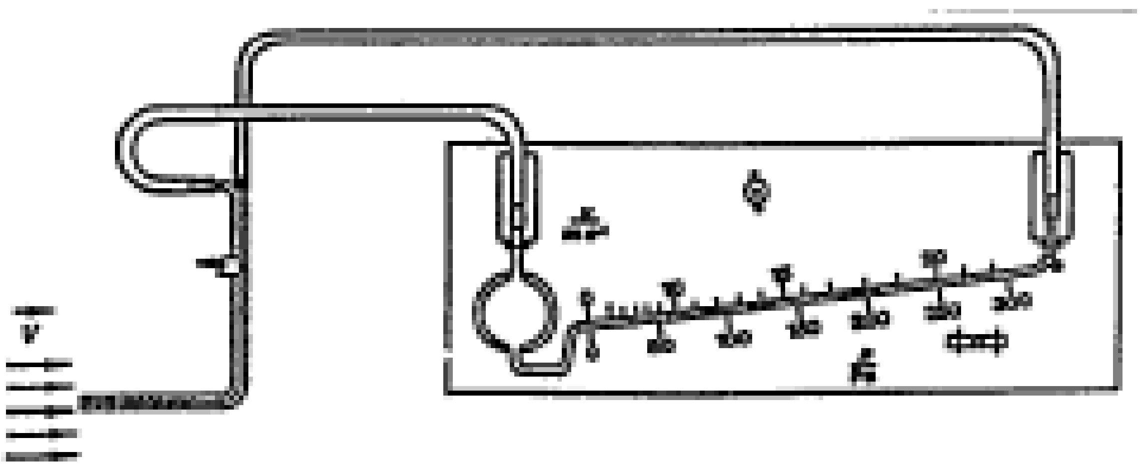
TD23 AD2



Tube de Pitot : TD23 AD3



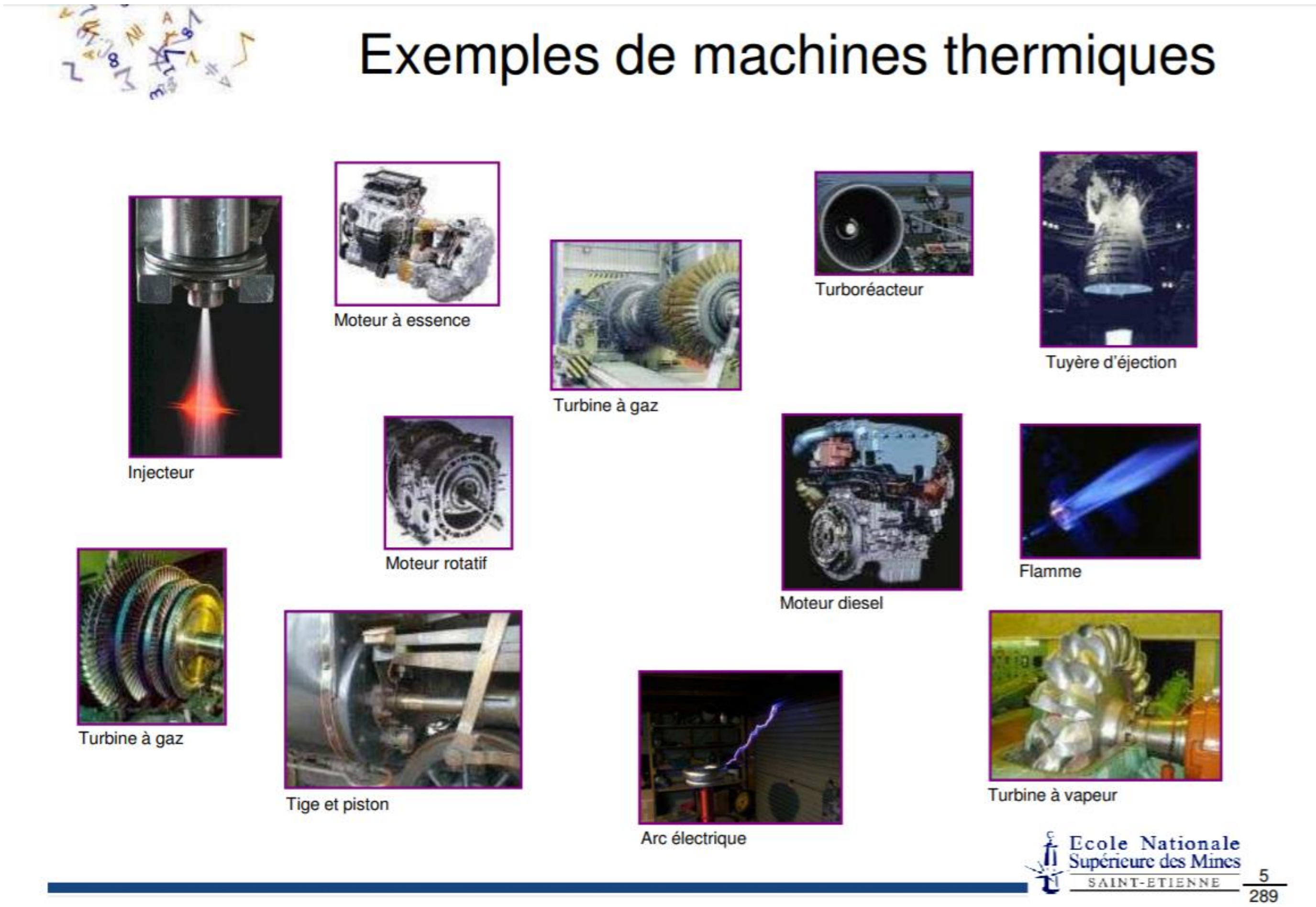




Les sondes de Pitot sur les avions

III. Bilans thermodynamiques

1. Premier et deuxième principes appliqués à un fluide en écoulement stationnaire au travers d'une machine thermique



Puissance thermique ↔ **Machine thermique = Convertisseur** ↔ **Puissance mécanique**

Enoncés :

1^er^ principe :

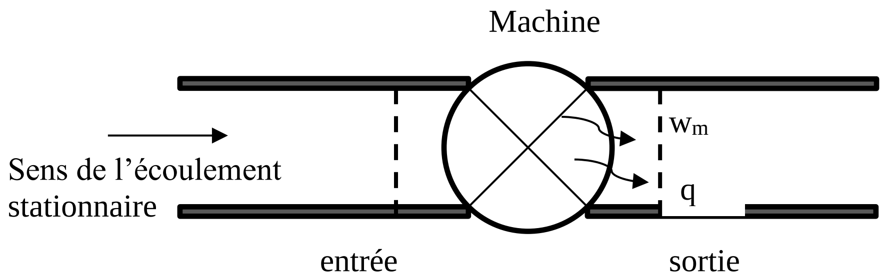
Dans le cas d'un écoulement permanent et stationnaire les transferts thermiques q et mécaniques w_m reçus par l'unité de masse de fluide de la part d'une machine s'expriment en fonction de la variation de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'enthalpie massiques :

$$(e_{cs} - e_{ce}) + (e_{ps} - e_{pe}) + (h_s - h_e) = w_m + q$$

ou

$$D_m[(e_{cs} - e_{ce}) + (e_{ps} - e_{pe}) + (h_s - h_e)] = \mathcal{P}_{\text{méca}} + \mathcal{P}_{\text{thermique}}$$

Avec D_m le debit massique, $\mathcal{P}_{\text{méca}}$ et $\mathcal{P}_{\text{thermique}}$ respectivement les puissances mécanique et thermique reçues par le fluide lors de son passage au travers de la machine
Les grandeurs intensives indicées e (respectivement s) représentent l'état du fluide avant (respectivement après) la machine.



2è principe :

Dans le cas d'un écoulement permanent et stationnaire l'entropie échangée $\mathscr{s}_{\text{éch}}$ et l'entropie crée $\mathscr{s}_{\text{crée}}$ reçues par l'unité de masse de fluide de la part d'une machine s'expriment en fonction de la variation de l'entropie massique :

$$(s_s - s_e) = \mathscr{s}_{\text{éch}} + \mathscr{s}_{\text{crée}}$$

où $\mathscr{s}_{\text{éch}} = q / T_{ext}$ et $\mathscr{s}_{\text{crée}} = 0$ pour une transformation réversible et $\mathscr{s}_{\text{crée}} > 0$ pour une transformation irréversible.

2. Applications :

Machines thermiques usuelles :

Machines pour lesquelles on pourra en général négliger les variations d'énergies potentielle et cinétique devant les variations d'énergie interne et d'enthalpie, le bilan précédent devient alors :

$$\boxed{(h_s - h_e) = w_m + q \quad \text{ou} \quad D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_{\text{méca}} + \mathcal{P}_{\text{thermique}}}$$

Compresseur adiabatique : Le fluide reçoit du travail d'un système mécanique.

$w_m > 0$ et $q = 0$ d'où $h_s - h_e = w_m$ ou $D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_{\text{méca}}$. Pour un compresseur $h_2 - h_1 > 0$.

Compresseur isotherme : cela signifie que $T_s = T_e$

$$h_s - h_e = q + w_m \text{ ou } D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_{\text{méca}} + \mathcal{P}_{\text{thermique}}$$

si le fluide est un gaz parfait, h ne dépend que de T, donc $h_s - h_e = 0$, soit $q + w_m = 0$ et

$$\mathcal{P}_{\text{méca}} + \mathcal{P}_{\text{thermique}} = 0.$$

Détendeur : réalisé en faisant passer un fluide à travers une paroi poreuse par exemple, il n'y a pas de machine donc $w_m = 0$ et la détente est très souvent adiabatique donc $q=0$

$$h_s - h_e = 0$$

Cette détente est isenthalpique ; il s'agit de la détente de Joule-Thomson

Turbine : partie mécanique entraînée par le fluide en écoulement, le fluide cède du travail à la machine. Les turbines sont souvent adiabatiques, q=0 d'où

$$h_s - h_e = w_m \text{ et } D_m(h_S - h_e) = \mathcal{P}_{méca}$$

Pour une turbine $w_m < 0$ donc $h_s - h_e < 0$.

Chambre de combustion : ne comporte en général pas de parties mobiles, c'est à dire $w_m = 0$

$$\text{d'où } h_s - h_e = q \text{ et } D_m(h_S - h_e) = \mathcal{P}_{thermique},$$

la combustion est souvent isobare et le système reçoit de la chaleur donc $q > 0$.

Echangeur thermique : ne comporte en général pas de parties mobiles, c'est à dire $w_m = 0$

$$\text{d'où } h_s - h_e = q \text{ et } D_m(h_S - h_e) = \mathcal{P}_{thermique},$$

l'échangeur est souvent isobare et le système échange de la chaleur avec le milieu extérieur $q > 0$ ou $q < 0$.

<u>Tuyère</u> :

Une tuyère est un tuyau dont la section peut-être variable, dans laquelle on ne négligera plus les variations de l'énergie cinétique, mais en général on négligera toujours les variations d'énergie potentielle. Le bilan s'écrit alors :

$$\boxed{(e_{cs} - e_{ce}) + (h_s - h_e) = w_m + q \quad \text{ou} \quad D_m[(e_{cs} - e_{ce}) + (h_s - h_e)] = \mathcal{P}_{méca} + \mathcal{P}_{thermique}}$$

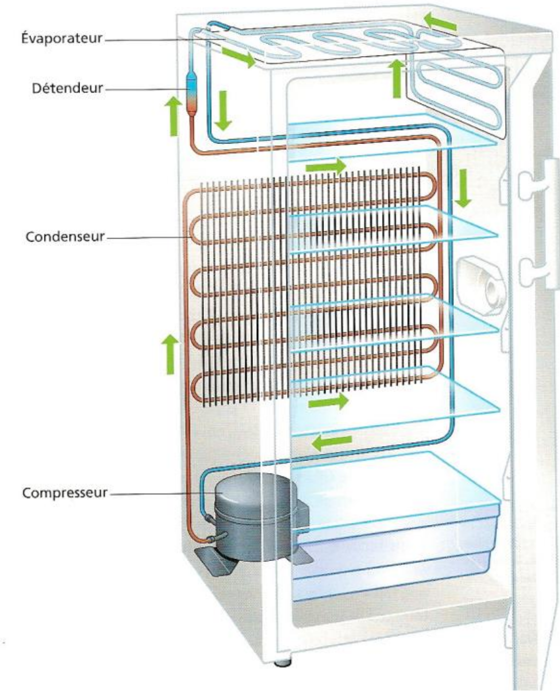
Les tuyères sont en général adiabatiques q = 0 et ne comportent pas de parties mobiles $w_m = 0$, d'où

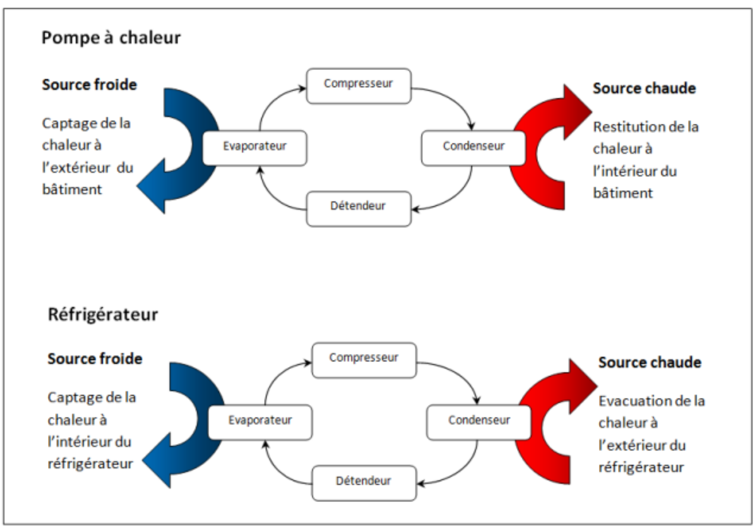
$$(ec_s - ec_e) + (h_s - h_e) = 0.$$

3. Etude d'une machine thermique à l'aide d'un diagramme (P, h)
AD2 TD 24

4. Etude théorique d'une machine ditherme en circuit fermé (Rappels de première année)

<u>Réalisation pratique d'une machine thermique :</u>





Une machine thermique est constituée de plusieurs organes où circule un fluide qui peut changer d'état. A chaque organe correspond un des échanges caractéristiques mis en jeu dans la machine.

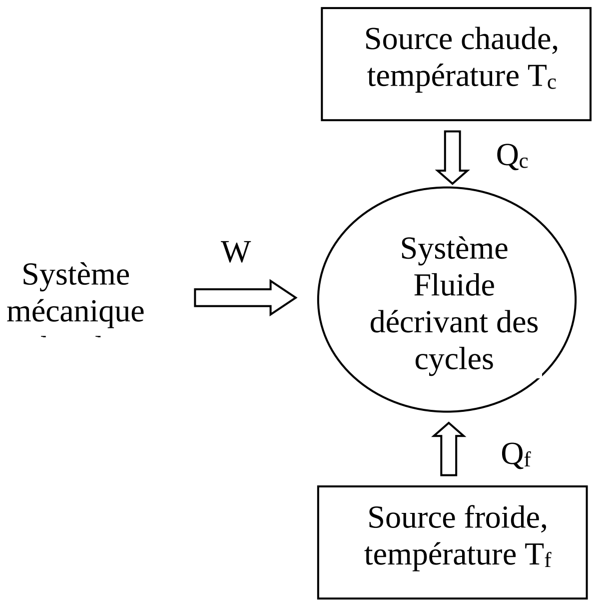
Ainsi dans le schéma de principe d'une machine frigorifique repésenté ci-dessous, le compresseur fournit à la machine le travail W.
Le condenseur (situé à l'arrière d'un réfrigérteur par exemple) constitue la source chaude : le fluide, en se liquéfiant, restitue à l'extérieur la chaleur négative Q_C.
L'évaporateur (à l'intérieur du réfrigérateur) constitue la source froide : le fluide y reçoit, en se vaporisant, la chaleur positive Q_F.

Une machine thermique est en pratique constituée d'un fluide (air, fréon, eau…) qui circule au travers une suite fermée d'organes (compresseur, échangeur, chambre de combustion, détendeur, turbine, tuyère…) avec lesquels il réalise des échanges énergétiques. Le système est le fluide qui décrit des cycles.

Etude théorique des machines thermiques (rappel 1ère année)

Une machine est un système qui réalise une conversion ou un transfert d'énergie. Une machine thermique convertit un transfert thermique en travail mécanique, (moteur) ou un travail mécanique en transfert thermique (machines frigorifiques).

Une machine thermique est *monotherme* si elle échange de la chaleur avec une seule source, *ditherme*, si elle échange de la chaleur avec deux sources.



On symbolise par le diagramme ci- contre le principe de fonctionnement d'une machine cyclique ditherme :
Le système :
reçoit un transfert thermique Q_c de la source chaude,
reçoit un transfert thermique Q_f de la source froide,
reçoit un transfert mécanique W du système mécanique.

D'après le premier principe, appliqué au fluide décrivant des cycles :

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f = 0$$

(la machine étant au repos macroscopique son énergie cinétique ne varie pas)

D'après le second principe, appliqué au fluide décrivant des cycles :

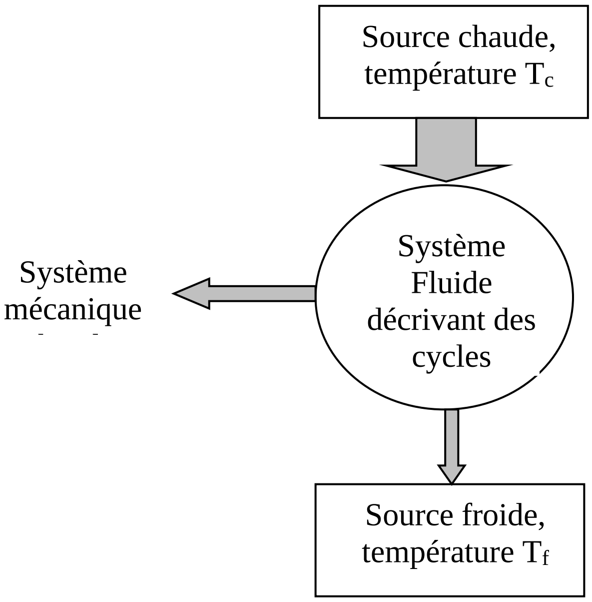
$$\Delta S = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + \mathcal{S}_{\text{création}} = 0$$

Or $\mathcal{S}_{\text{création}} \geq 0$ d'où $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$ ce qui constitue l'énoncé de Clausius du 2è principe.

Remarque : si les températures des sources varient dans le temps, on écrira les deux principes sous forme élémentaire, pendant la durée dt où on peut supposer la température des sources constante.

$dU = \delta W + \delta Q_c + \delta Q_f = 0$ et $dS = \frac{\delta Q_c}{T_c} + \frac{\delta Q_f}{T_f} + \delta\mathcal{S}_{\text{création}} = 0$

Si W < 0, la machine est un moteur.



Le second principe n'autorise pas l'existence de moteur cyclique monotherme. (Théorème de Kelvin)

Pour la machine ditherme, on aura alors forcément $Q_c > 0$ et $Q_f < 0$.
Le sens ***REEL*** des échanges énergétiques peut alors être représenté par les flèches grises sur le schéma ci-contre.

Le rendement de la machine est donné par

$$\eta = \left|\frac{gain}{dépense}\right| = \left|\frac{W}{Q_c}\right| = -\frac{W}{Q_c}$$

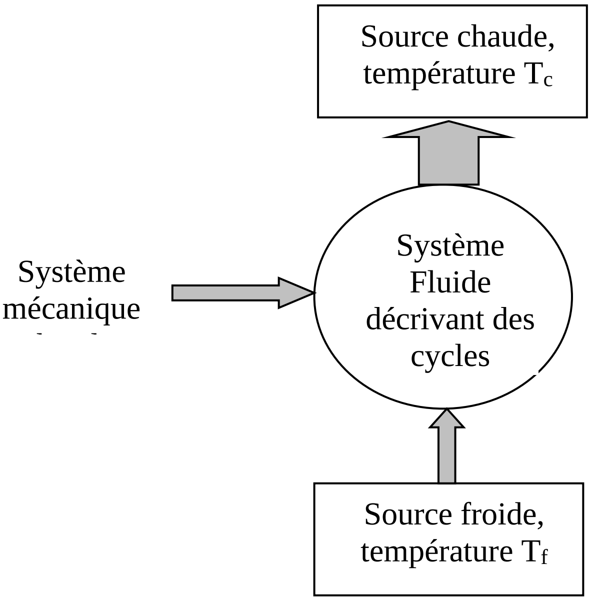
La source froide étant l'atmosphère, la source chaude la chambre de combustion du carburant.

Le moteur idéal a un fonctionnement réversible, il s'agit du moteur de Carnot, tel que $\mathcal{S}_{création} = 0$.

Le rendement du moteur de Carnot est $\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$.

Tous les autres moteurs ont un rendement inférieur à celui du moteur de Carnot.

Si W > 0, la machine est une machine frigorifique.



Le but d'une telle machine étant de prélever de la chaleur à la source froide, on en déduit que
$Q_f > 0$ et $Q_c < 0$, avec forcément $-Q_c > Q_f$.
Le sens ***REEL*** des échanges énergétiques peut alors etre représenté par les flèches grises sur le schéma ci- contre.

Si la machine est un ***réfrigérateur***, son rendement, ou efficacité est

$$\eta = e_f = \left|\frac{gain}{dépense}\right| = \left|\frac{Q_f}{W}\right| = \frac{Q_f}{W}$$

La source froide étant l'intérieur de réfrigérateur et la source chaude, l'atmosphère.

Si la machine est une ***pompe à chaleur***, son rendement, ou efficacité est $\eta = e_p = \left|\frac{gain}{dépense}\right| = \left|\frac{Q_c}{W}\right| = -\frac{Q_c}{W}$

La source froide étant l'atmosphère, ou l'eau en contact avec le milieu extérieur et la source chaude, la pièce que l'on désire chauffer.

Equivalence entre le théorème de l'énergie cinétique et le premier principe de la thermodynamique

<table>
<tr><th></th><th>Mécanique : théorème de l'énergie cinétique</th><th>Thermodynamique : 1er principe</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Macro</td><td>$\Delta Ec = W$
de TOUTES les forces appliquées au système</td><td>$\Delta U + \Delta Ec = W + Q$
transferts thermiques et mécaniques reçus par le système du milieu extérieur</td></tr>
<tr><td>$\Delta Ec = W(\vec{F}_{ext}) + W(\vec{F}_{int})$
$W(\vec{F}_{ext}) \rightarrow$ Forces à distance : poids
$W(\vec{F}_{ext}) \rightarrow$ Forces de contact $\rightarrow$ pression ; Viscosité externe
$W(\vec{F}_{ext}) \rightarrow$ Machine
$W(\vec{F}_{int}) \rightarrow Q$
$W(\vec{F}_{int}) \rightarrow - \Delta U$</td><td>$W \rightarrow$ Forces à distance : poids
$W \rightarrow$ Forces de contact $\rightarrow$ pression ; Viscosité externe
$W \rightarrow$ Machine
$Q \rightarrow$ Machine
$Q \rightarrow$ Viscosité externe</td></tr>
<tr><td>$\Delta Ec = W(\vec{F}_{conservatives}) + W(\vec{F}_{non\ conservatives})$

$W(\vec{F}_{conservatives}) = - \Delta Ep$ (poids)
$W(\vec{F}_{non\ conservatives}) \rightarrow$ Forces de contact $\rightarrow$ pression ; Viscosité
$W(\vec{F}_{non\ conservatives}) \rightarrow$ Machine
$W(\vec{F}_{non\ conservatives}) \rightarrow -\Delta U$
$W(\vec{F}_{non\ conservatives}) \rightarrow Q$</td><td></td></tr>
<tr><td>$\Delta Ec + \Delta Ep = W(\vec{F}_{non\ conservatives})$
$\Delta Em = W(\vec{F}_{non\ conservatives})$
Théorème de l'énergie mécanique</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="8">Micro</td><td>$dEc = \delta W$
$dEc + dEp = \delta W(\vec{F}_{non\ conservatives})$</td><td>$dU + dEc = \delta W + \delta Q$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Régime stationnaire</td></tr>
<tr><td colspan="2">$dEc = Dm(e_{cs} - e_{ce})dt$</td></tr>
<tr><td>$dEp = Dm(e_{ps} - e_{pe})dt = Dmg(z_s - z_e)dt$
l'axe z est orienté selon la verticale ascendante</td><td>$dU = Dm(u_s - u_e)dt$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Puissances en régime stationnaire</td></tr>
<tr><td>$\frac{dEc}{dt} = D_m.(e_{cs} - e_{ce}) = \mathcal{P}$
de toutes les forces appliquées au système (internes et externes)

$\frac{dEc}{dt} + \frac{dEp}{dt} = D_m.[\frac{1}{2}(v_s^2 - v_e^2) + g(z_s - z_e)] = \mathcal{P}$
des forces non conservatives</td><td>$\frac{dEc}{dt} + \frac{dU}{dt} = D_m.[(u_s - u_e) + (e_{cs} - e_{ce})] =$
$\mathcal{P}_{méca\ ext} + \mathcal{P}_{th\ ext}$</td></tr>
</table>

Les lettres minuscules indiquent des énergies massiques en $J.kg^{-1}$

IV. Autres bilans mécaniques

1. Bilan de quantité de mouvement

2. Bilan de moment cinétique

<u>Catalogue des bilans</u>

Grandeur G du Système fermé	Nom de la loi	expression	Cause de la variation de la grandeur G
Masse m	Se conserve pour un système fermé	m(t+dt) = m(t) $\frac{dm}{dt} = 0$	La masse ne varie pas car le système est fermé
Quantité de mouvement totale $\vec{P}$	Théorème de la résultante cinétique	$\frac{d\vec{P}}{dt} = \overrightarrow{F_{ext}}$	Les forces extérieures appliquées au système
Moment cinétique scalaire total L_Δ	Théorème scalaire du moment cinétique	$\frac{dL_\Delta}{dt} = M_\Delta(\overrightarrow{F_{ext}})$	Les moments des forces extérieures
Energie cinétique Ec	Théorème de l'énergie cinétique	$\frac{dE_c}{dt} = P_{int} + P_{ext}$	La puissance des forces intérieures et extérieures
Energie mécanique E_m = Ec + Ep	Théorème de l'énergie mécanique	$\frac{dE_m}{dt} = P$ (forces non conservatives)	La puissance des forces non conservatives
Energie totale E = Ec + U	Premier principe	$\frac{d(E_c+U)}{dt} = P_{méca} + P_{th}$	Echanges thermiques et mécaniques avec le milieu extérieur
Entropie S	Deuxième principe	$\frac{dS}{dt} = \frac{\delta\xi_{éch}}{dt} + \frac{\delta\xi_{créa}}{dt}$ $\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T_{ext}}\frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta\xi_{créa}}{dt}$	Echanges thermiques et irréversibilité