



Thermodynamique industrielle

BLAISE PASCAL
PT 2024-2025

I - Approche globale

$$\text{performance} = \left| \frac{\text{échange énergétique intéressant}}{\text{échange énergétique coûteux}} \right|$$

	Diagramme des échanges	Performance	Carnot
Moteur <i>produire un travail mécanique à partir de chaleur</i>		Rendement $-\frac{W}{Q_c} = -\frac{\mathcal{P}_m}{\mathcal{P}_c}$ $(\eta < 1)$	$\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$
Pompe à chaleur <i>transfert thermique effectif du froid vers le chaud</i>		Efficacité ou COP $-\frac{Q_c}{W} = -\frac{\mathcal{P}_c}{\mathcal{P}_m}$ $(e > 1)$	$e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$
Réfrigérateur <i>transfert thermique effectif du froid vers le chaud</i>		Efficacité frigorifique ou COP froid $\frac{Q_f}{W} = \frac{\mathcal{P}_f}{\mathcal{P}_m}$ $(e > 1 \text{ en général})$	$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$

▷ Pour les machines réceptrices (= PAC et réfrigérateur) :

$$\text{efficacité de Carnot} = \frac{\text{température de la source intéressante}}{\text{écart de température entre les sources}}$$

- ▷ Cycle de Carnot = deux isothermes aux températures des sources + compression adiabatique réversible + détente adiabatique réversible.
- ▷ La source chaude peut parfois être un modèle sans réalité physique, en particulier pour une production de chaleur par combustion.

II - Principes de la thermodynamique pour un fluide en écoulement

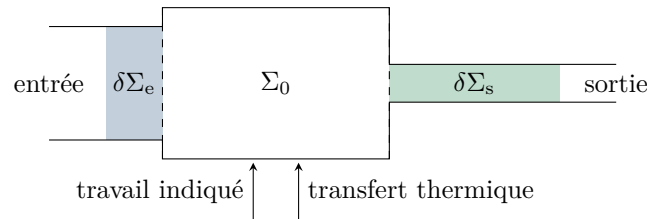
Principes appliqués à un composant thermodynamique parcouru par un fluide en écoulement.

- **Démonstration** : très proche du théorème de Bernoulli.

Stationnarité \implies les grandeurs physiques relatives à Σ_0 sont indépendantes du temps.

Se ramener à un système fermé :

- ▷ à l'instant t : $\Sigma_f = \Sigma_0 + \text{PF}$ qui vont entrer dans Σ_0 entre t et $t + dt$;
- ▷ à l'instant $t + dt$: $\Sigma_f = \Sigma_0 + \text{PF}$ qui sont sorties de Σ_0 entre t et $t + dt$;
- ▷ bilan de masse : par stationnarité, $\delta\Sigma_e$ et $\delta\Sigma_s$ ont la même masse $\delta m = D_m dt$ (masse traversant).



Variation d'énergie totale ($E = E_m + U$) de Σ_f entre t et $t + dt$:

▷ Première expression : par construction de Σ_f et par stationnarité,

$$dE_f = \left[E_0(t+dt) + \delta m u_s + \frac{1}{2} \delta m v_s^2 + \delta m g z_s \right] - \left[E_0(t) + \delta m u_e + \frac{1}{2} \delta m v_e^2 + \delta m g z_e \right]$$

▷ Deuxième expression : par le premier principe, (\bar{V} = volume massique)

$$dE_{m,f} = \delta W_i + \delta Q + P_e D_m \bar{V}_e dt - P_s D_m \bar{V}_s dt .$$

car le travail des forces de pression s'écrit (côté entrée avec signe \oplus car moteur, idem avec signe \ominus côté sortie)

$$\delta W_{p,e} = \mathcal{P}_{p,e} dt = +P_e S_e v_e dt = +P_e D_V dt = +P_e D_m \bar{V}_e dt .$$

▷ Identification des deux expressions puis $h = u + P\bar{V}$.

• Conclusion : premier principe industriel

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp} = w_i + q \quad D_m (\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{pp}) = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{th}$$

où Δ = valeur en sortie - valeur en entrée \neq valeur finale - valeur initiale (aucun sens car stationnarité).

• Second principe : bilan d'entropie

$$\Delta s = s_s - s_e = s_{éch} + s_{créée} = \frac{q}{T_{ext}} + s_{créée} \quad D_m (s_s - s_e) = \frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}} + \sigma_{créée}$$

avec $\sigma_{créée}$ le taux de production d'entropie.

• **Système à plusieurs entrées et sorties** : seules des écritures en puissance sont utilisables.

$$\sum_{\text{entrées } i} D_{m,i} = \sum_{\text{sorties } j} D_{m,j}$$

$$\sum_{\text{sorties } j} D_{m,j} \left(h_j + \frac{1}{2} v_j^2 + g z_j \right) - \sum_{\text{entrées } i} D_{m,i} \left(h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + g z_i \right) = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_i$$

$$\sum_{\text{sorties } j} D_{m,j} s_j - \sum_{\text{entrées } i} D_{m,i} s_i = \frac{\mathcal{P}_{th}}{T_{ext}} + \sigma$$

III - Quelques composants des installations industrielles

• **Hypothèse usuelle** : $\Delta e_c + \Delta e_{pp} \ll \Delta h$... sauf pour une tuyère.

• **Tableau récapitulatif** :

Dispositif	Rôle	w_i	q	Premier principe
Détendeur	Diminuer la pression (et la température) du fluide : $\Delta P < 0$	0	0	$\Delta h = 0$
Turbine	Récupérer un travail mécanique (et diminuer la pression du fluide)	< 0	0	$\Delta h = w_i < 0$
Compresseur, pompe	Augmenter la pression (et la température) du fluide : $\Delta P > 0$	> 0	0	$\Delta h = w_i > 0$

Dispositif	Rôle	w_i	q	Premier principe
Tuyère	Convertir l'enthalpie en énergie cinétique : $\Delta e_c > 0$	0	0	$\Delta h + \Delta e_c = 0$
Échangeur thermique simple flux	Permettre un échange thermique avec le milieu extérieur	0	$\neq 0$	$\Delta h = q$
Échangeur thermique double flux	Permettre un échange thermique entre deux écoulements	0	interne	$D_{m1} \Delta h_1 + D_{m2} \Delta h_2 = 0$
Mélangeur	Mélanger deux fluides	0	0	$D_{ms} h_s - (D_{m1} h_{e1} + D_{m2} h_{e2}) = 0$
Séparateur	Séparer un mélange diphasique	0	0	$(D_{m,V} h_V + D_{m,L} h_L) - D_{me} h_e = 0$

• **Rendement isentropique** : quantifie les performances d'une turbine (resp. d'un compresseur) en comparant la travail récupéré (resp. fourni) à celui qui aurait été récupéré (resp. qu'il aurait fallu fournir) avec une turbine réversible pour les mêmes pression d'entrée et de sortie.

$$\eta_{S,turbine} = \frac{w_{réel}}{w_{max}} \quad \text{et} \quad \eta_{S,compresseur} = \frac{w_{min}}{w_{réel}}$$

↪ expression à retrouver sachant que $\eta_S < 1$.

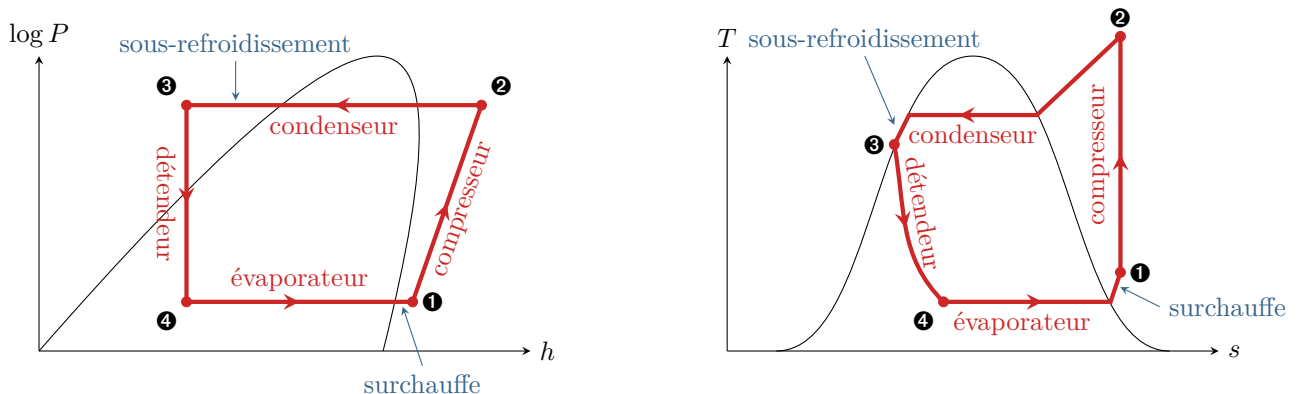
IV - Cycles classiques

• **Cycle frigorifique** (toute machine frigorifique : PAC, réfrigérateur, congélateur, etc.).

▷ *Structure à quatre éléments* :

- évaporateur isobare : vaporise le fluide en prélevant de l'énergie à la source froide ;
- compresseur idéalement isentropique : augmente la température de manière adiabatique grâce à un apport de travail pour avoir $T > T_c$ en entrée du condenseur ;
- condenseur isobare : liquéfie le fluide en cédant de l'énergie à la source chaude ;
- détendeur isenthalpique : baisse la température de manière adiabatique pour avoir $T < T_f$ en entrée de l'évaporateur.

▷ *Allure du cycle* : (à retenir en frigoristes, à savoir interpréter en diagramme entropique)



▷ *Sens de parcours du cycle* : cycle frigo en sens trigo dans tous les diagrammes.

▷ *Optimisation du cycle* :

- surchauffe sans effet sur le COP, mais le compresseur ne doit pas aspirer de liquide sous peine de casse : contrainte technologique ;
- sous-refroidissement permet une nette amélioration du COP : choix thermodynamique.

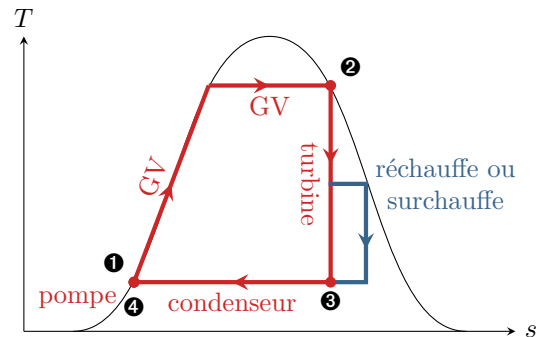
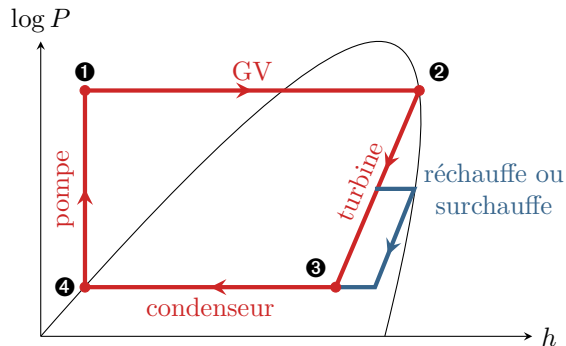
▷ *Ordre de grandeur* : COP \sim 3 à 6 pour une PAC domestique.

- **Cycle moteur de Rankine** (nombreuses installations motrices, en particulier pour la production d'électricité)

- ▷ *Structure à quatre éléments :*

- générateur de vapeur ou chaudière isobare : chauffe puis vaporise l'eau pressurisée (source chaude) ;
- turbine idéalement isentropique : détente du fluide en cédant du travail ;
- condenseur isobare : liquéfie totalement l'eau à basse pression (source froide) ;
- pompe isentropique et isotherme : augmente la pression de l'eau à l'état liquide.

- ▷ *Allure du cycle :* (pas forcément à retenir mais à savoir interpréter)



Toutes les isobares sont collées à la courbe de saturation, donc l'effet de la pompe ne se voit pas en diagramme entropique : les points 4 et 1 sont confondus.

- ▷ *Sens de parcours du cycle :* cycle moteur en sens horaire dans tous les diagrammes.

- ▷ *Optimisation du cycle :*

- détente dans deux turbines successives séparées par une réchauffe (ou surchauffe) permet de limiter le titre en liquide dans la turbine, et donc d'augmenter sa durée de vie : choix technologique ;
- poursuivre la liquéfaction jusqu'à l'état de liquide pur diminue le rendement mais permet d'utiliser une pompe, facile à concevoir mais qui ne doit pas aspirer de vapeur : choix technologique.

- ▷ *Ordre de grandeur :* $\eta \sim 0,3$ pour toute centrale thermique.