

SEMESTRE 5 – UE FONDLEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

COMPLÉMENTS

Gilles PERNOT

gilles.pernot@univ-lorraine.fr

Bureau 404.1 (4^{ème} étage ENSEM)

Jean-Christophe PERRIN



UE FONDLEMENTS DE LA MÉCANIQUE

THERMODYNAMIQUE

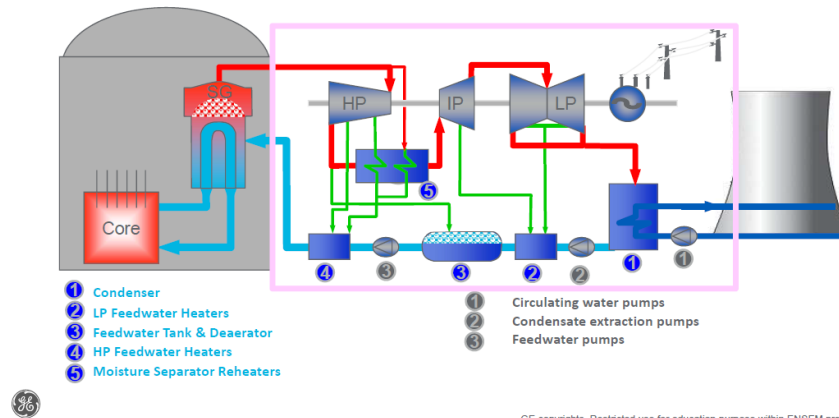
PARTIE 6: MACHINES THERMIQUES

- ❖ INTRODUCTION
 - ❖ MACHINES MONOTHERMES
 - ❖ MACHINES DITHERMES
 - ❖ INFLUENCE DE L'IRRÉVERSIBILITÉ SUR LE RENDEMENT
 - ❖ MACHINE DE CARNOT
 - ❖ MOTEURS À COMBUSTION INTERNE
-



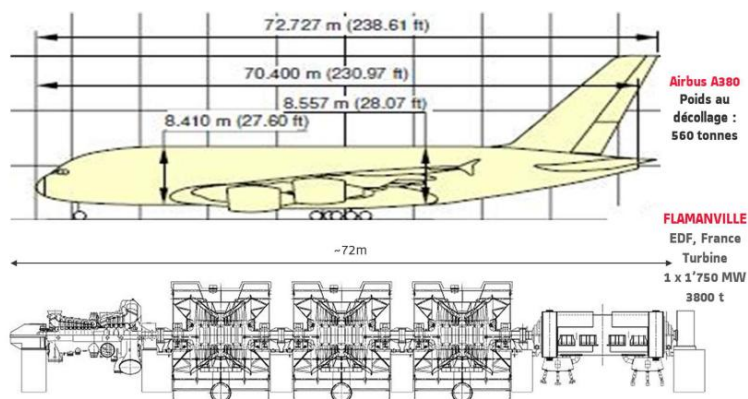
Introduction: machines thermiques et conversion de l'énergie

The power conversion loop



3

Introduction: machines thermiques et conversion de l'énergie



4

Introduction: machines thermiques et conversion de l'énergie

Arabelle: 15+ years of excellent operational experience gained at Chooz & Civaux (France)



The first ARABELLE at Chooz B1 NPP (France)

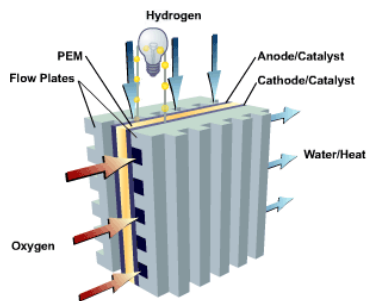


- N4 reactors in France are equipped with ARABELLE STGs
- 4 identical units operated by EDF
- 1550 MWe each (gross output at generator terminals)
- 1st unit commercial operation in 2000
- As of today, more than 350,000 operating hours accumulated
- Turbine measured reliability rate: 99.96%

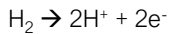
GE copyrights. Restricted use for education purpose within ENSEM premises

Introduction: machines thermiques et conversion de l'énergie

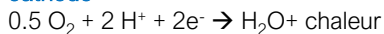
❖ Pile à combustible à membrane échangeuse d'ions



anode



cathode



❑ Convertit H₂ en

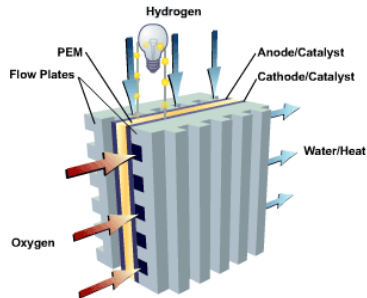
- Électricité
- Eau
- Chaleur

❑ Fonctionne à basse température (60 - 80°C)

❑ Peut alimenter des unités de faible et moyenne puissance

- Applications mobiles (10 W)
- Véhicules (~ 100 kW)
- Applications stationnaires (1 kW → 1 MW)

❖ Pile à combustible à membrane échangeuse d'ions



anode
 $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

cathode
 $0.5 O_2 + 2 H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O + \text{chaleur}$

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PEME : Proton Exchange Membrane Electrolyser

- ☐ systèmes électrochimiques (en dehors du cours cette année)
- ☐ électrolyseur = réaction opposée à pile à combustible

Les couleurs de l'hydrogène (H_2) :

- ☐ **noir / gris** : produit à partir d'hydrocarbures (reformage du gaz naturel)
- ☐ **vert** : produit à partir d'énergie renouvelable
- ☐ **blanc** : H_2 naturel

VIDÉO - "C'est du jamais vu" : sur la piste de l'hydrogène blanc, au coeur d'un forage en Moselle

Depuis décembre 2022, des chercheurs lorrains sont à la recherche d'hydrogène dans le sous-sol de Folschviller, en Moselle. Ils soupçonnent que ce gaz soit produit naturellement à plus de 3 kilomètres sous la surface. France Bleu Lorraine a visité l'un des puits.



Jacques Pronon présente cette sonde unique au monde, brevetée il y a quelques mois. © Radio France - Bastien Munch



https://www.lepoint.fr/environnement/un-potentiel-gisement-d-hydrogene-colossal-decouvert-en-lorraine-03-09-2023-2533754_1927.php#11

❖ Voici le plus puissant électrolyseur d'hydrogène au monde



Laurent GAUTHIER 6 juillet 2023

L'installation d'électrolyse de Sinopac, à Kucha / Image : Sinopac, gouvernement de Chine.

1

L'installation a une capacité de production initiale de 10 000 tonnes d'hydrogène par an, et est prévue pour pouvoir produire jusqu'à 20 000 t/an. Elle est équipée de 52 électrolyseurs de 5 MW, pour une puissance totale de 260 MW. Les électrolyseurs sont fournis par Cockerill Jingli Hydrogen, Longi Hydrogen et PERIC. Le site peut stocker 210 000 m³ d'hydrogène et les canalisations ont un débit maximal de 28 000 m³/h.

À titre de comparaison, le futur plus grand site de production d'hydrogène « vert » de France sera équipé d'un électrolyseur de 40 MW. Il sera donc 6,5 fois moins puissant que son homologue chinois.

<https://www.revolution-energetique.com/voici-le-plus-puissant-electrolyseur-dhydrogene-au-monde/>



L'installation d'électrolyse de Sinopec, à Kucha / Image : Sinopec, gouvernement de Chine.

11



Dans ce cours:

- ☐ introduction à quelques cycles thermodynamiques
- ☐ systèmes fermés

12

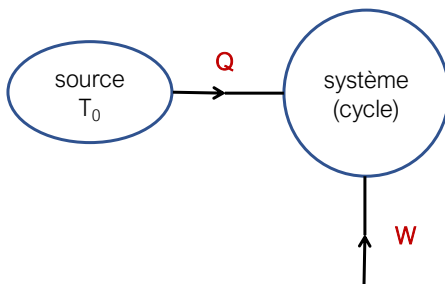
Cycles

- ❖ Une **MACHINE** est un appareil utilisé de façon reproductible pendant un certain temps.
- ❖ Le système revient périodiquement à l'état initial.
- ❖ Une machine décrit un **CYCLE**.
- ❖ Etude des **MACHINES** → étude de CYCLES particuliers.

13

Machines monothermes

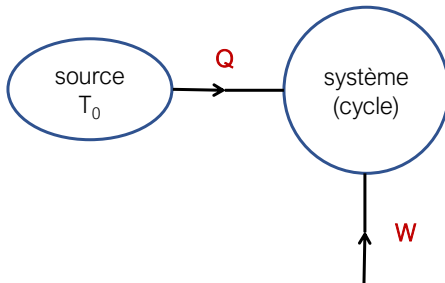
- ❖ Peut-on **fournir** du travail dans un cycle à partir de la chaleur échangée avec **une seule source de chaleur** ?



14

Machines monothermes

❖ Peut-on **fournir** du travail dans un cycle à partir de la chaleur échangée avec **une seule source de chaleur** ?



NON !

au cours d'un cycle, un système en contact avec une seule source de chaleur ne peut que recevoir du travail et fournir de la chaleur.

Démonstration:

◦ premier principe: $\Delta U = 0 = W + Q$

◦ second principe: $\Delta S = 0 = Q/T_0 + S^{crée}$

Donc $Q = -T_0 \cdot S^{crée}$ or $S^{crée} \geq 0$ d'où $W \geq 0$ et $Q \leq 0$

⇒ Une machine monotherme ne peut que recevoir du travail et fournir de la chaleur

⇒ Il n'existe pas de machine monotherme **MOTRICE**

15

Machines monothermes

❖ Exemples:

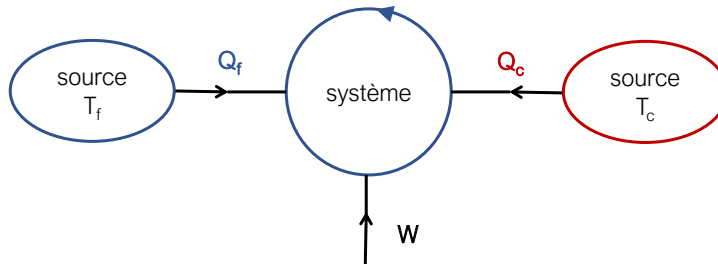
❑ **RADIATEUR ÉLECTRIQUE** (convecteur) : converti de l'énergie électrique (reçue sous forme de travail) en « chaleur ».

❑ **FROTTEMENTS MÉCANIQUES** : converti de l'énergie mécanique en « chaleur ».

16

Machines dithermes

- ❖ Une machine ditherme échange de l'énergie par transfert thermique avec deux thermostats
 ⇒ deux sources de chaleur.



Avec:

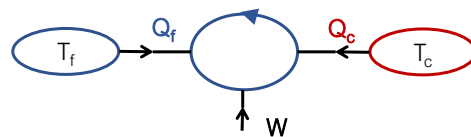
- ☐ $T_c > T_f$
- ☐ W : le travail reçu
- ☐ Q_c : la chaleur reçue (source chaude)
- ☐ Q_f : la chaleur reçue (source froide)

17

Machines dithermes

- ❖ Pour une machine (cycle) :

- ☐ 1^{er} principe : $\Delta U = 0 = Q_f + Q_c + W$
- ☐ 2^{ème} principe: $\Delta S = 0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S^{crée}$



- ❖ 1^{er} cas (sens naturel): le système reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide.

$$Q_f < 0 \text{ et } Q_c > 0$$

⇒ $W < 0$: **MOTEUR**

- ❖ 2^{ème} cas (sens contraire au sens naturel): le système reçoit de la chaleur de la source froide et en fournit à la source chaude.

$$Q_f > 0 \text{ et } Q_c < 0$$

⇒ $W > 0$: **RECEPTEUR**

réfrigérateur pompe à chaleur

18

Machines dithermes: moteur

❖ En partant de l'hypothèse d'un cycle moteur: $W < 0$

❑ 1^{er} principe : $\Delta U = 0 = Q_f + Q_c + W \Rightarrow Q_f = -Q_c - W$

❑ 2^{ème} principe: $\Delta S = 0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S^{crée} \Rightarrow \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0$

❑ En combinant ces deux relations: $\frac{Q_c}{T_c} - \frac{W}{T_f} - \frac{Q_c}{T_f} \leq 0$

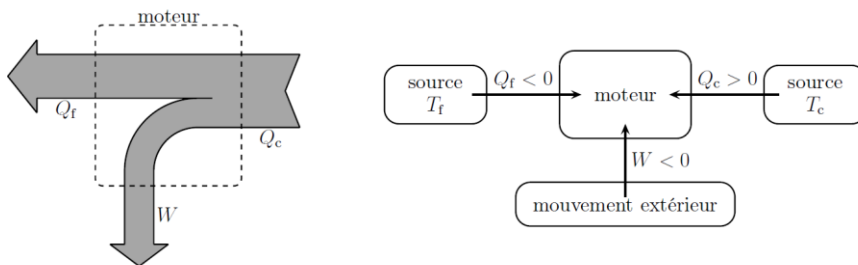
$$-\frac{W}{T_f} \leq -Q_c \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c} \right)$$

>0 $\downarrow$ >0
 >0

19

Machines dithermes: moteur

❖ Le rôle d'un moteur ditherme est de fournir un travail.

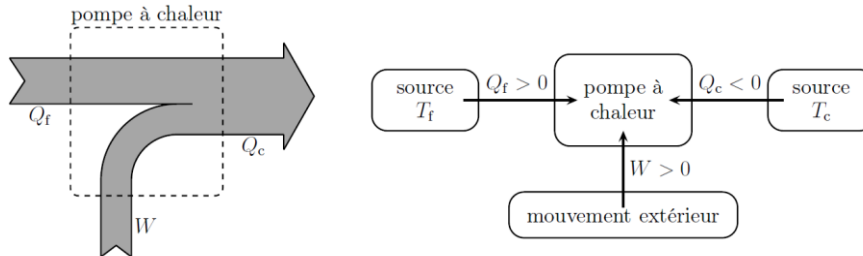


$$\text{Rendement } \rho = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = -\frac{W}{Q_c} < 1$$

20

Machines dithermes: pompe à chaleur

- ❖ Le rôle d'une pompe à chaleur est de fournir de l'énergie par transfert thermique à la source chaude (réchauffe le chaud tout en refroidissant le froid).



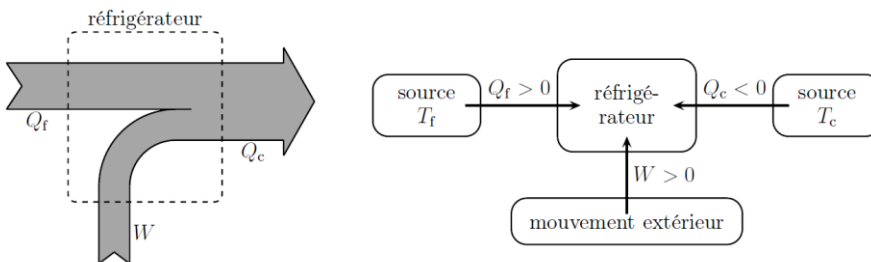
- ❖ L'efficacité caractérise la qualité du transport énergétique de la source froide à la source chaude

$$\text{Efficacité } e = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = -\frac{Q_c}{W} > 1$$

21

Machines dithermes: réfrigérateur

- ❖ Le rôle d'un réfrigérateur est de capter de l'énergie par transfert thermique à la source froide (refroidi le froid).



$$\text{Efficacité } \rho = \left| \frac{Q_f}{W} \right| = \frac{Q_f}{W}$$

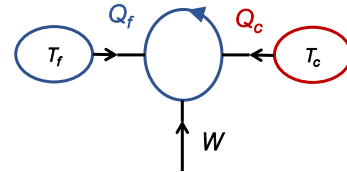
22

Machines dithermes

❖ Cas réversible:

$$\Delta S = 0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + \cancel{S^{crée}} = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \Rightarrow Q_f = -T_f \cdot \frac{Q_c}{T_c}$$

$$\text{Et } W^{rev} = -Q_c - Q_f = -Q_c \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right)$$

❖ Si $Q_c < 0$; $W > 0 \Rightarrow$ Récepteur❖ Si $Q_c > 0$; $W < 0 \Rightarrow$ Moteur

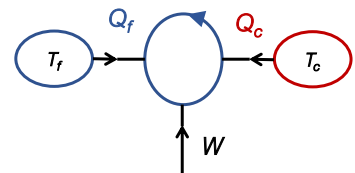
23

Machines dithermes

❖ Cas irréversible:

$$\Delta S = 0 = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S^{crée} = \frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} + S^{crée} \Rightarrow Q_f = -T_f \cdot \left(\frac{Q_c}{T_c} + S^{crée}\right)$$

$$\text{Et } W^{irr} = -Q_c - Q_f = -Q_c \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) + T_f \cdot S^{crée}$$

❖ Si $Q_c < 0$; $W > 0 \Rightarrow$ Récepteur avec $W^{irr} > W^{rev}$ ❖ Si $Q_c > 0$; $W < 0 \Rightarrow$ Moteur ou $W = 0$ si les irréversibilités sont trop grandes

24

Influence de l'irréversibilité sur le rendement

❖ Exemple pour un moteur (cas irréversible):

$$Q_f = -T_f \cdot \left(\frac{Q_c}{T_c} + S^{crée} \right) \text{ et } W^{irr} = -Q_c \left(1 - \frac{T_f}{T_c} \right) + T_f \cdot S^{crée}$$

$$\frac{W^{irr}}{Q_c} = \frac{T_f}{T_c} + \frac{T_f}{Q_c} \cdot S^{crée} - 1$$

❖ Le rendement s'écrit $\rho = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = 1 - \left(\frac{T_f}{T_c} + \frac{T_f}{Q_c} \cdot S^{crée} \right) \Rightarrow$ le rendement diminue si $S^{crée}$ augmente.

❖ $\left| \frac{Q_f}{T_f} \right| = \frac{Q_c}{T_c} + S^{crée} \Rightarrow$ le transfert à la source froide est minimum pour $S^{crée} = 0$.

❖ Le rendement est maximum si la machine est réversible.

25

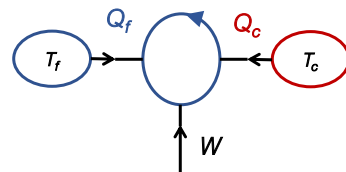
Machines dithermes

❖ Rendement / Efficacité POUR UNE MACHINE REVERSIBLE

❖ Moteur: $\rho = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = 1 - \frac{T_f}{T_c} < 1 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \square \text{ ne dépend que des températures des sources} \\ \square \text{ augmente si l'écart entre } T_c \text{ et } T_f \text{ augmente} \end{cases}$

❖ Pompe à chaleur: $e = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad \left. \vphantom{\frac{T_c}{T_c - T_f}} \right\} \begin{cases} \square \text{ augmente si l'écart entre } T_c \text{ et } T_f \text{ diminue} \end{cases}$

❖ Réfrigérateur: $e = \left| \frac{Q_f}{W} \right| = \frac{T_f}{T_c - T_f}$



26

La machine de Carnot

❖ La machine idéale parcourt un cycle thermodynamique où tout est réversible $\Rightarrow$ pas d'entropie créée.

❑ Pour les transformations au contact du thermostat, il faut $T = T_e \Rightarrow$ transformations **isothermes**.

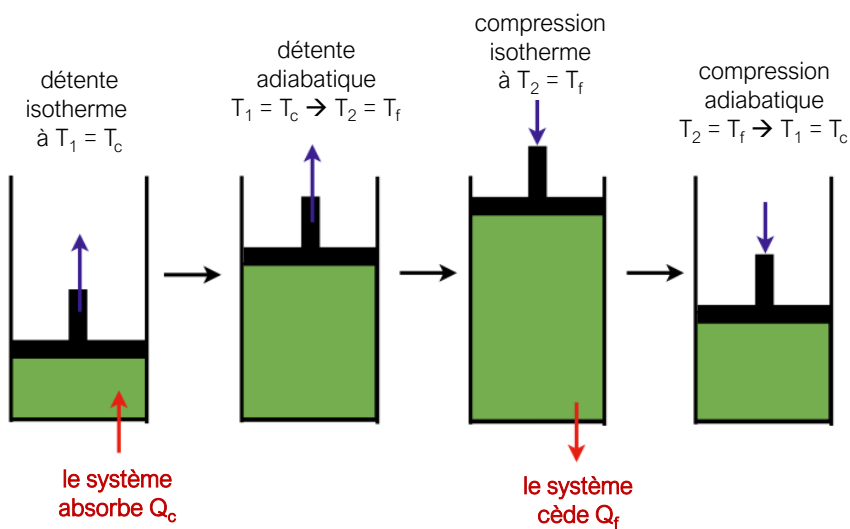
❑ Pour les autres transformations $\Rightarrow$ pas d'échange thermique: **adiabatiques réversibles** (isentropiques)

❖ Le cycle de Carnot est le cycle d'une machine ditherme fonctionnant de façon idéale

2 transformations isothermes + 2 transformations adiabatiques

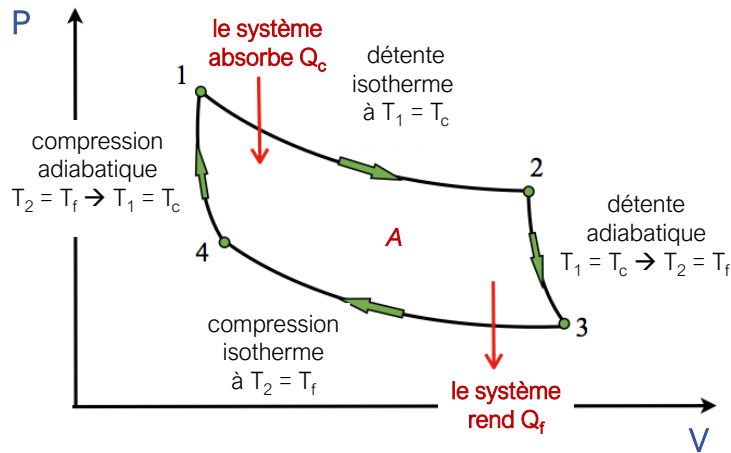
27

La machine de Carnot



28

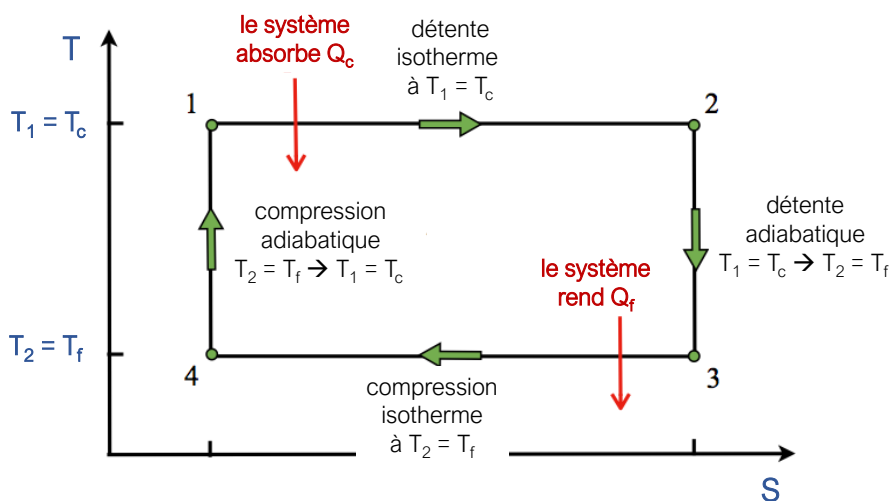
La machine de Carnot – diagramme de Clapeyron



$$W = \int_{(1)}^{(3)} -PdV + \left(- \int_{(3)}^{(1)} -PdV \right) = -A \quad \text{si le cycle est parcouru dans le sens horaire, } W < 0 \Rightarrow \text{MOTEUR}$$

29

La machine de Carnot – diagramme entropique



30

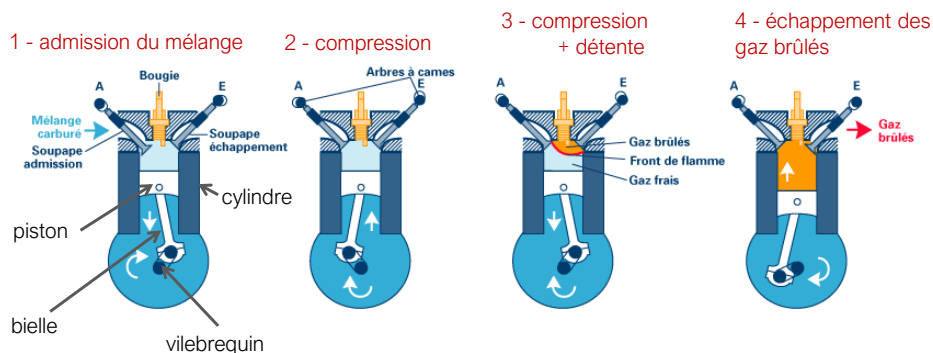
Moteurs à combustion interne

- ❖ Dans un moteur à combustion interne, l'énergie thermique dégagée par la combustion est transformée en énergie mécanique directement à l'intérieur du moteur, en opposition au moteur à combustion externe où l'énergie est transportée par un fluide caloporteur à l'extérieur de celle-ci (ex: turbine à vapeur).
 - ❑ La source CHAUDE = combustion à l'intérieur du système
 - ❑ La source FROIDE = échappement des gaz à l'extérieur du système
- ❖ Pendant le cycle :
 - ❑ On évacue l'air chaud.
 - ❑ On reprend de l'air frais.
- ❖ Le cycle est ouvert (on considère qu'il s'agit du même gaz, chauffé puis complètement refroidi).

31

Moteurs à combustion interne: moteur à 4 temps

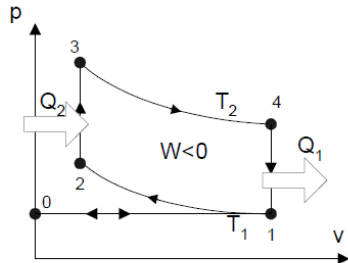
- ❖ Principe de fonctionnement: cycle à **4 temps** à allumage commandé



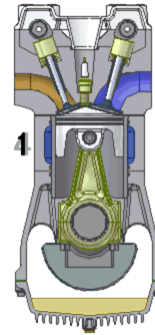
32

Moteurs à combustion interne: moteur à 4 temps

Cycle de Beau de Rochas (moteur à essence 4 temps)



- 0 → 1 : Admission
- 1 → 2 : Compression adiabatique
- 2 → 3 : Explosion très rapide (isochore)
- 3 → 4 : Détente adiabatique avec production de travail
- 4 → 1 : Baisse de pression lors de l'ouverture de la soupape
- 1 → 0 : Échappement



4 temps (2 tours de vilebrequin)

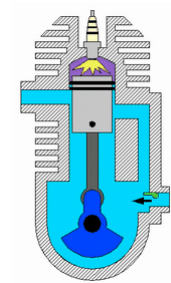
- 1 - admission
- 2 - compression
- 3 - explosion + détente
- 4 - échappement

33

Moteurs à combustion interne: moteur à 2 temps

❖ Principe de fonctionnement: cycle à 2 temps à allumage commandé

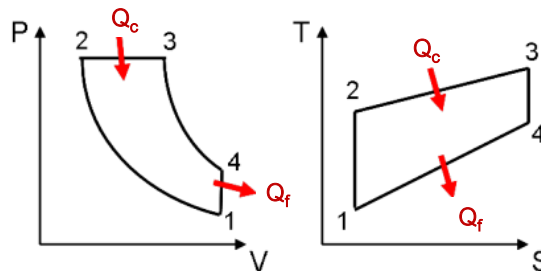
- ❑ Dans un cycle à deux temps, les mêmes opérations sont effectuées (admission, compression, explosion, détente, échappement) mais en un seul aller-retour du piston dans le cylindre.
- ❑ 1 cycle moteur par tour (au lieu de 1 tous les 2 tours pour le moteur 4 temps)
- ❑ C'est le déplacement du piston et la présence de lumières dans le cylindre et le carter qui permettent de remplir le cylindre de gaz frais et d'évacuer les gaz brûlés



34

Moteurs à combustion interne: moteur Diesel

- ❖ le carburant est injecté après la compression
- ❖ la pression est maintenue constante par la combustion en même temps que le piston se déplace
- ❖ animations: étapes du cycles <http://www.shermanlab.com/science/physics/thermo/engines/DieselG.php>



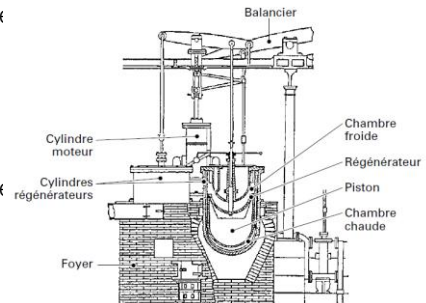
35

PARTIE 7: LE MOTEUR STIRLING

- ❖ HISTORIQUE
- ❖ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT
- ❖ LE CYCLE STIRLING
- ❖ ENERGIES MISES EN JEU
- ❖ PERFORMANCES - CAS DU RÉGÉNÉRATEUR PARFAIT
- ❖ PERFORMANCES - CAS DU RÉGÉNÉRATEUR RÉEL
- ❖ MOTEUR STIRLING DE TYPE GAMMA
- ❖ INTÉRÊTS DU MOTEUR STIRLING
- ❖ LIMITATIONS DE LA PERFORMANCE

Historique

- ❖ **1816:** Robert Stirling invente un moteur à combustion externe (fluide caloporteur: air) suivant le cycle:
 - ❑ chauffage – détente – refroidissement – compression
 - ❑ il invente également le régénérateur de chaleur
- ❖ **1843:** Application industrielle par James Stirling (ingénieur dans une fonderie écossaise à Dundee)
 - ❑ Moteur à un cylindre moteur et deux cylindres régénérateurs
 - ❑ Puissance env. 15 kW; consommation env. 25 kg charbon/h
 - ❑ Peu de compétitivité devant les machines à vapeur et disparition avec l'apparition des MCI (puissance trop faible).
- ❖ **1871:** Description mathématique par Gustav Schmidt grâce à l'avancée de la thermodynamique.



37

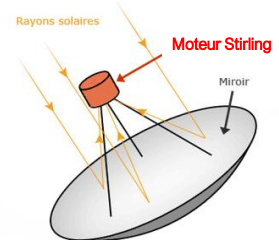
Historique

- ❖ **Jusqu'en 1922:** Quelques applications industrielles et agricoles (pompe à eau, entraînement de générateur de courant électrique)
- ❖ **1938:** Phillips développe le moteur à air chaud (appelé moteur Stirling)
 - ❑ Moteur à > 200 cv avec un rendement > 30%
 - ❑ Application principalement en cryogénie
- ❖ **Aujourd'hui:** Applications de niche où la performance justifie le coût (militaire, recherche, technologie de pointe)
 - ❑ Principalement dans le domaine de la réfrigération industrielle et des applications militaires (moteurs marins, satellites et sondes spatiales)
 - ❑ Couplé à un four solaire (parabole solaire géante) pour production d'électricité
 - ❑ Rendement supérieur aux cellules photovoltaïques ($\eta > 30\%$)



- Moteur Stirling type « alpha »
- Fluide caloporteur: H_2 à 180bar max
- Puissance électrique: env. 10kWe
- Rendement électrique net: 32%

Principe de fonctionnement



38

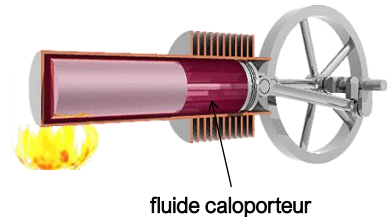
Principe de fonctionnement

❖ Moteurs a combustion interne (MCI):

- ❑ Apport de chaleur dans la chambre de combustion
- ❑ La chaleur provient dans la plupart du temps par combustion d'un combustible fossile

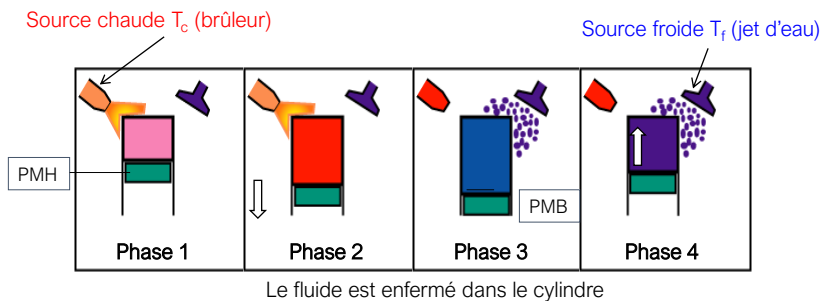
❖ Moteurs a combustion externe (MCE):

- ❑ Conversion de l'énergie thermique en travail mécanique par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur subissant un cycle thermodynamique FERME
- ❑ Pas de combustion à l'intérieur du moteur
- ❑ Le fluide de travail demeure dans le moteur
- ❑ Le chauffage du fluide peut se faire sans combustion : solaire, géothermie, nucléaire, etc.

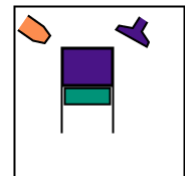


39

Principe de fonctionnement



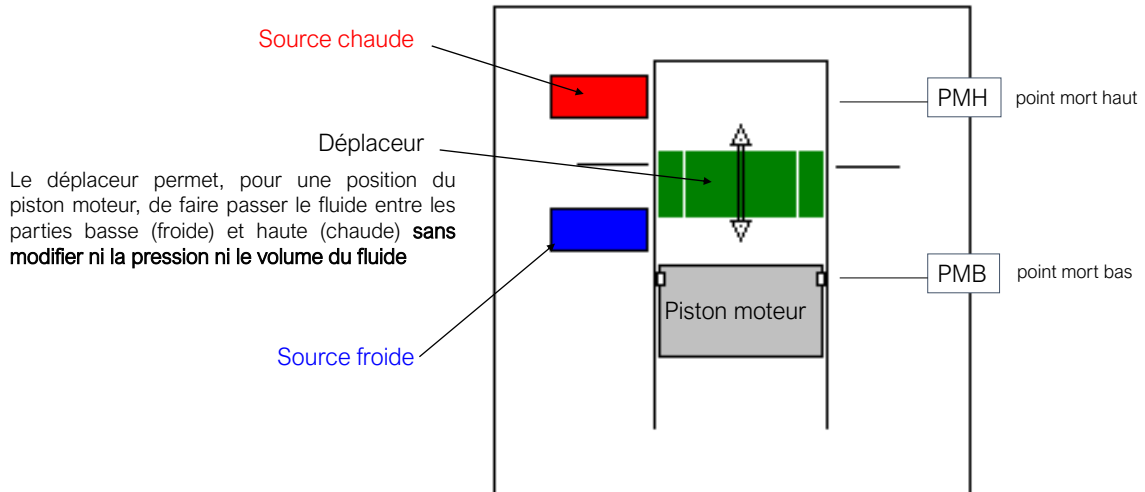
- | | |
|---|---|
| ❑ Phase 1 : Chauffage à V constant | → Augmentation de pression ($Q+$) |
| ❑ Phase 2 : Détente isotherme $T = T_c$ | → Augmentation de volume ($W-$ et $Q+$) |
| ❑ Phase 3 : Refroidissement à V constant | → Diminution de pression ($Q-$) |
| ❑ Phase 4 : Compression isotherme $T = T_f$ | → Diminution de volume ($W+$ et $Q-$) |



- ❖ Mais un tel moteur poserait divers problèmes techniques: allumer/éteindre le brûleur/l'aspergiment du jet d'eau, présence de chocs thermiques,...

40

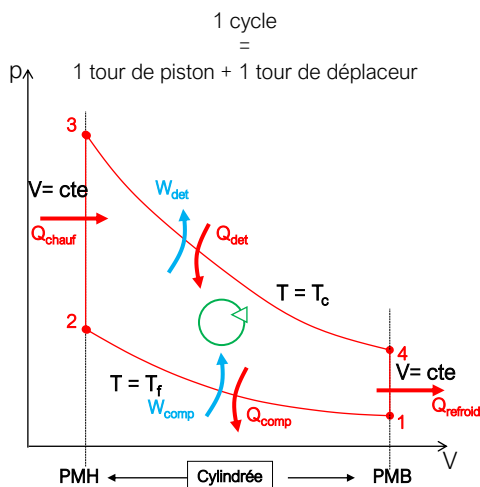
Principe de fonctionnement



❖ Les mouvements du piston et du déplaceur sont synchronisés par un système mécanique.

41

Le cycle Stirling (moteurs à gaz chaud 4 temps)



❖ 4 phases du cycle moteur:

- ☐ Chauffage
- ☐ Détente
- ☐ Déplacement du fluide vers la source froide et refroidissement
- ☐ Compression et retour du fluide vers la source chaude

❖ 4 phases du cycle théorique (réversible) sur le diagramme de Clapeyron:

- ☐ 1-2 Compression (isotherme)
- ☐ 2-3 Chauffage (isochore)
- ☐ 3-4 Détente (isotherme)
- ☐ 4-1 Refroidissement (isochore)

L'inversion du cycle correspond à un cycle frigorifique → utilisation en cryogénie (production de froid)

42

Energies mises en jeu

❖ **Hypothèses:** GP diatomiques, transformations quasi-statiques réversibles

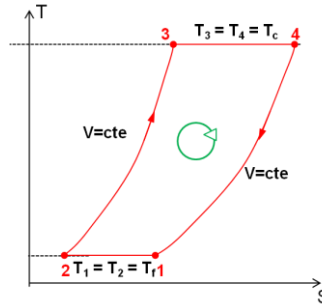
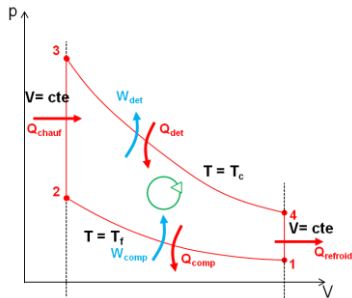
- | | |
|---|---|
| ❑ Travail de compression ($T = \text{cte}$): | $\Delta U_{12} = W_{12} + Q_{12} = 0 \rightarrow W_{12} = r T_1 \ln(V_1/V_2) = -Q_{12} > 0$ |
| ❑ Chaleur fournie au fluide ($V = \text{cte}$): | $\Delta U_{23} = Q_{23} = C_v (T_3 - T_1) > 0$ |
| ❑ Travail de détente à $T = \text{cte}$ (temps moteur): | $\Delta U_{34} = W_{34} + Q_{34} = 0 \rightarrow W_{34} = r T_3 \ln(V_2/V_1) = -Q_{34} < 0$ |
| ❑ Chaleur cédée par le fluide ($V = \text{cte}$): | $\Delta U_{41} = Q_{41} = C_v (T_1 - T_3) < 0$ |

Travail net par cycle (1 tour de piston + 1 tour de déplaceur):

$$W_{\text{net}} = (W_{12} + W_{34}) < 0$$

Chaleur totale fournie par cycle :

$$Q_{\text{fournie}} = (Q_{23} + Q_{34}) > 0$$



43

Performances - cas du régénérateur (économiseur) parfait

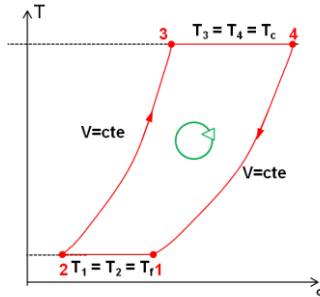
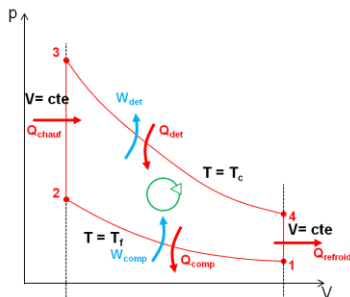
❖ Rendement du cycle Stirling:

$$\eta = \frac{-W_{\text{net}}}{Q_{\text{fournie}}} = -\frac{W_{12} + W_{34}}{Q_{23} + Q_{34}}$$

❖ en définissant le taux de compression $\rho = V_1/V_2$

$$\eta = -\frac{(T_3 - T_1) \cdot \ln \rho}{\frac{T_3 - T_1}{\gamma - 1} + T_3 \cdot \ln \rho} < \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

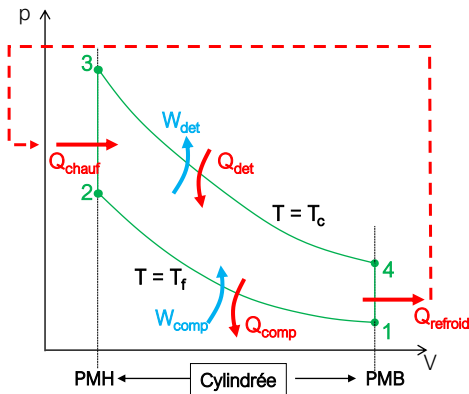
rendement du cycle Stirling < inférieur
rendement cycle Carnot : rôle du
régénérateur



44

Performances - cas du régénérateur (économiseur) parfait

- ❖ Hypothèse : l'énergie thermique nécessaire au chauffage du fluide (2-3) est récupérée en phase de refroidissement (4-1): rôle du régénérateur = échangeur de chaleur
- ❖ Pour un échangeur parfait (rendement $\eta = 1$):



- ❑ $|Q_{\text{refroid}}| = |Q_{41}| = Q_{23}$
- ❑ Chaleur totale fournie par cycle : $Q_{\text{fournie}} = Q_{34} > 0$
- ❑ Travail net par cycle: $W_{\text{net}} = (W_{12} + W_{34}) < 0$
- ❑ Rendement d'un cycle Stirling:

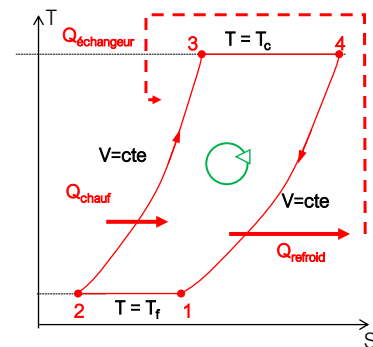
$$\eta = -\frac{|W_{12} + W_{34}|}{Q_{34}} = 1 - \frac{W_{12}}{|W_{34}|}$$

45

Performances - cas du régénérateur (économiseur) parfait

$$\Rightarrow \eta_S = \frac{|W_{12} + W_{34}|}{Q_{34}} = 1 + \frac{W_{12}}{W_{34}}$$

$$\eta_S = 1 - \frac{T_1}{T_3} = \eta_{\text{Carnot}}$$



- ❖ T_1 et T_3 étant respectivement les températures des sources froide et chaude, ce rendement est égal à celui du cycle Carnot.
- ❖ En réalité les échanges de chaleur ne sont pas parfaits:

$$Q_{\text{échangeur}} < Q_{\text{fournie}}$$

46

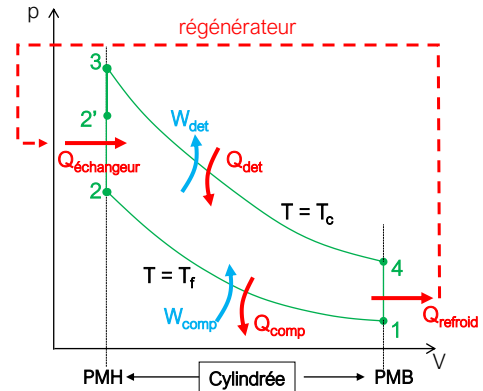
Performances - cas du régénérateur réel

- ❖ Dans le cas où le régénérateur n'est pas parfait : **efficacité** $\varepsilon < 1$
- ❖ L'échangeur chauffe le fluide à une température $T_{2'}$ inférieur à celle de la source chaude: $T_{2'} < T_3$.
- ❖ **Efficacité de l'échangeur** (hypothèses: GP, transformations réversibles)

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{échangeur}}}{Q_{\text{fournie}}} = \frac{C_V (T_{2'} - T_1)}{C_V (T_3 - T_1)} = \frac{T_{2'} - T_1}{T_3 - T_1}$$

- ❖ La source chaude doit apporter un complément de chaleur afin d'apporter le fluide de $T_{2'}$ à T_3 .
- ❖ **Complément de chaleur** fournie par la source chaude:
 - ❑ Taux d'échauffement $k = T_3/T_1$

$$Q_{2'3} = \frac{r}{\gamma - 1} (1 - \varepsilon) T_1 (k - 1)$$



47

Performances - cas du régénérateur réel

- ❖ **Rendement thermodynamique** du cycle Stirling avec **échangeur réel**:

$$\eta = -\frac{W_{12} + W_{34}}{Q_{34} + Q_{2'3}} \quad \begin{array}{l} \text{- Taux de compression } r = v_1/v_2 \\ \text{- Efficacité échangeur } \varepsilon = \frac{Q_{22'}}{Q_{23}} \\ \text{- Taux d'échauffement } k = T_3/T_1 \end{array}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{(\gamma - 1)(k - 1) \ln \rho}{k(\gamma - 1) \ln \rho + (1 - \varepsilon)(k - 1)}$$

- ❑ La nature du fluide intervient à travers les capacités calorifiques.
 - ❑ Le rendement augmente avec $g = C_p/C_V$
- on préfère des fluides possédant un C_p élevé

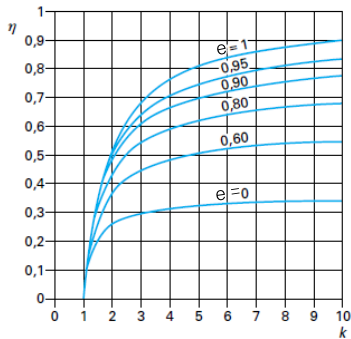
$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \eta_0 = \frac{(\gamma - 1)(k - 1) \ln \rho}{k(\gamma - 1) \ln \rho + (k - 1)} \quad \text{rendement cycle Stirling sans échangeur}$$

$$\varepsilon = 1 \Rightarrow \eta_s = \frac{k - 1}{k} = \eta_{\text{Carnot}} \quad \text{rendement cycle Stirling échangeur parfait}$$

48

Performances - cas du régénérateur réel

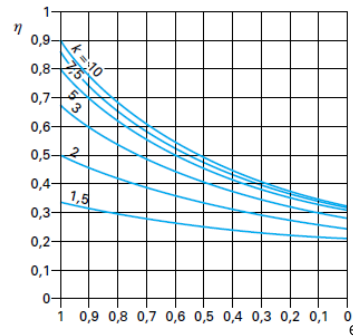
- ❖ En fonction du rapport des températures $k=T_3/T_1$



Le rendement du cycle Stirling **augmente avec l'écart de température** entre sources froide et chaude (même tendance pour l'écart des volumes).

- ❖ En fonction de l'efficacité du régénérateur e

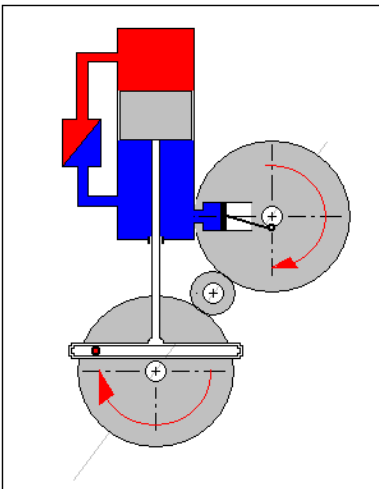
@ techniques de l'ingénieur



Le rendement du cycle Stirling **augmente avec l'efficacité de son échangeur**.

49

Moteur Stirling de type GAMMA



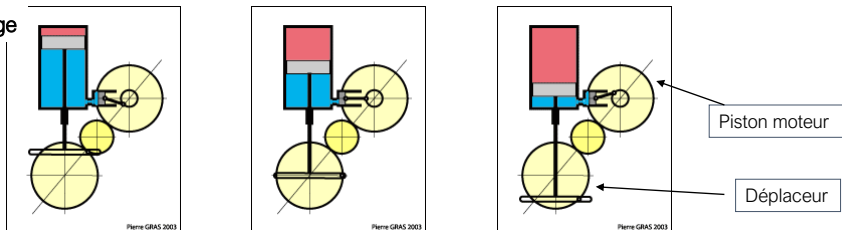
- ❖ **Deux cylindres** : l'un contient le déplaceur et l'autre le piston moteur faisant varier le volume total.
→ séparation des pistons moteur et déplaceur
- ❖ **Application**: faibles écarts de température entre sources chaude et froide (moteur LTD « Low Temperature Difference »)



50

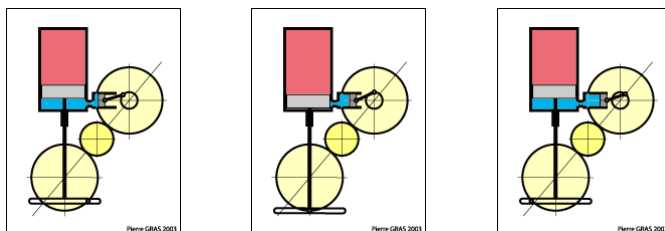
Les phases du moteur GAMMA

1. Chauffage



Le volume total est minimal, le piston moteur bouge peu, longue course du déplaceur.

2. Détente

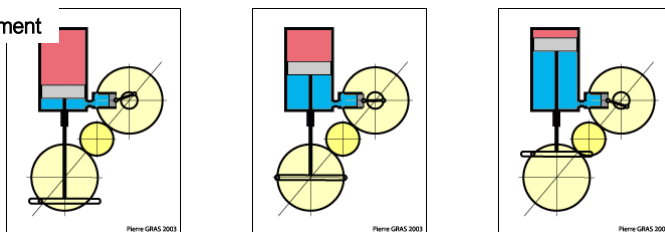


Le déplaceur bouge peu, longue course du piston moteur (> 70% de sa course),

51

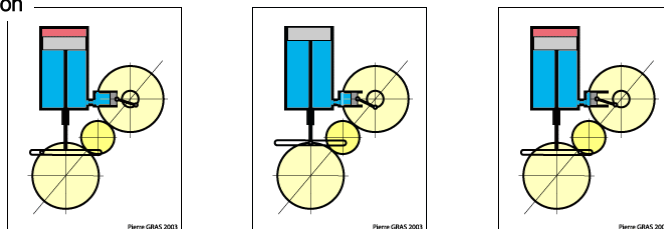
Les phases du moteur GAMMA

3. Refroidissement



Le volume total est maximal, le piston moteur bouge peu, longue course du déplaceur.

4. Compression

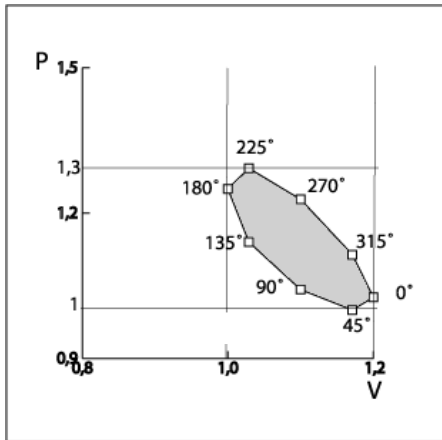


❖ Le déplaceur bouge peu, le gaz est globalement froid, le piston parcourt la plupart de sa course.

52

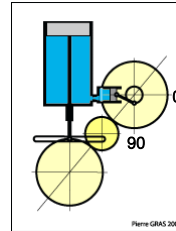
Le cycle Stirling du moteur GAMMA

❖ Diagramme P-V



$$T_c = 348\text{K} ; T_f = 290\text{K} ; h = 0,17$$

❖ Les quatre phases du moteur gamma



53

Intérêts du moteur Stirling

- ❑ Le cycle moteur est **inversible**. Un moteur Stirling entraîné par un moteur peut servir de pompe à chaleur (refroidissement jusqu'à environ -200°C ou réchauffement jusqu'à environ 700°C selon le sens du transfert thermique.
- ❑ Le temps de réponse en régime variable est important, mais il peut fonctionner à n'importe quel régime stabilisé (1 cycle/s jusqu'à 50 cycles/s)
- ❑ Moteur à **forte densité énergétique** (env. 80cv/litre de cylindrée pour env. 50cv/litre pour un diesel)
- ❑ Moteur **silencieux**

54

Limitations de la performance

- ❑ Le **temps de réponse** du système en régime variable ne permet pas d'envisager de remplacer les MCI en particulier pour les véhicules routiers. Par contre, pour les régimes de fonctionnement stabilisés (moteurs marins, groupes électrogènes solaires, pompes ...) il pourrait être une solution alternative.
- ❑ Le **coût** : la production en grande série n'étant pas envisageable à court terme, le coût, à puissances égales, ne peut concurrencer avec les MCI (4T et 2T).
- ❑ L'**étanchéité**: le confinement du fluide de travail est le principal problème mécanique limitant la performance d'un moteur Stirling!

55

Limitations de la performance

❖ **Le fluide caloporteur:**

- ❑ L'air: fluide classique
 - ❑ L'hydrogène H_2 : C_p environ 14 fois supérieur à celui de l'air
 - ❑ L'hélium He : C_p environ 4 fois supérieur à celui de l'air
- } problèmes de confinement

❖ **Influence de la pression du fluide de travail**

$$W_{\text{moteur}} = W_{12} + W_{34} = -p_3 V_2 \ln p^*(k-1)/k \quad < 0$$

- ❑ Les équations montrent que la puissance de la machine est proportionnelle à la pression du fluide.
- ❑ Dans la pratique on recherchera donc une pression importante (de l'ordre de 100 à 200 bars) dans la limite des contraintes mécaniques et des problèmes de confinement (fuites).

56

Limitations de la performance

❖ Le régénérateur

- ❑ Dans la plupart des cas il s'agit d'un matériau poreux à forte capacité thermique
- ❑ Il doit assurer la plus grande transmission thermique avec le fluide en créant le minimum de pertes de charge.
- ❑ Thermiquement anisotrope (conductivité thermique radiale faible et conductivité thermique axiale grande).
- ❑ Sa puissance nominale de stockage doit être surdimensionnée (environ 5 à 10 fois la puissance nominale du moteur).
- ❑ On réalise actuellement des régénérateurs dont l'efficacité approche 0.9.



57

PARTIE 8: CHANGEMENT D'ÉTAT D'UN CORPS PUR

- ❖ CORPS PURS ET PHASES
- ❖ CHANGEMENT DE PHASE
- ❖ MISE EN ÉVIDENCE DU CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE-VAPEUR
- ❖ ÉVAPORATION / ÉBULLITION
- ❖ RÈGLE DES MOMENTS
- ❖ ÉQUILIBRE SOLIDE → LIQUIDE
- ❖ ÉQUILIBRE SOLIDE → GAZ

Corps purs et phases

❖ **CORPS PUR**: constitué d'une seule espèce chimique: H_2O , CO_2 , N_2 , Co , Fe ...

❖ **PHASE**: un corps pur peut exister sous plusieurs formes, appelées PHASES

❑ exemple pour l'eau: état solide (glace), état liquide, état gazeux (vapeur d'eau)

❖ Remarque: Les phases « liquide » et « gaz » sont uniques. Par contre, il peut exister plusieurs phases solides.

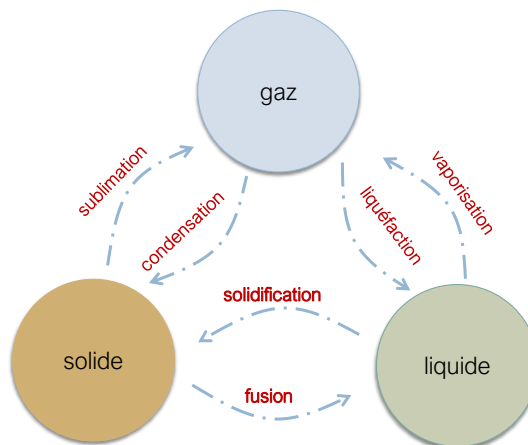
❑ Fer à $P = \text{constante}$: il existe plusieurs phases différentes, en fonction de T

- α [$0^\circ\text{C} \rightarrow 912^\circ\text{C}$]: ferrite
- β [$912^\circ\text{C} \rightarrow 1394^\circ\text{C}$]: austénite
- γ [$1394^\circ\text{C} \rightarrow 1563^\circ\text{C}$]

59

Changement de phase (changement d'état)

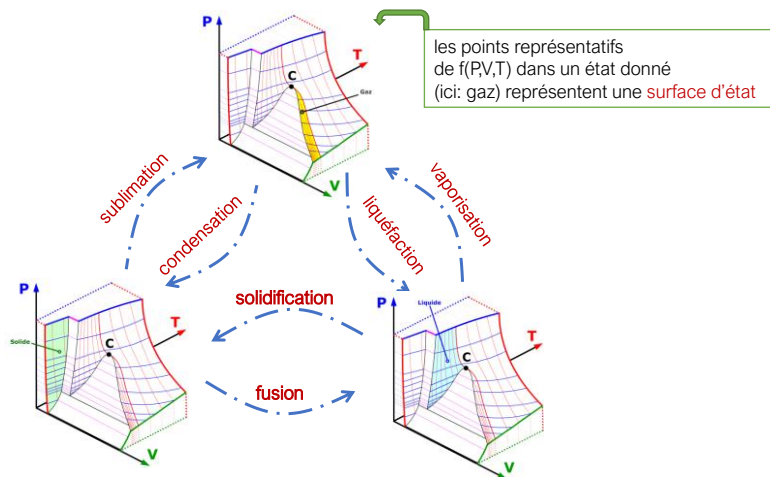
❖ **CHANGEMENT DE PHASE**: transformation faisant passer un corps pur d'un état (solide, liquide, gazeux) à un autre



60

Changement de phase (changement d'état)

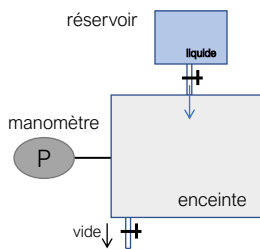
❖ **CHANGEMENT DE PHASE:** transformation faisant passer un corps pur d'un état (solide, liquide, gazeux) à un autre



61

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #1

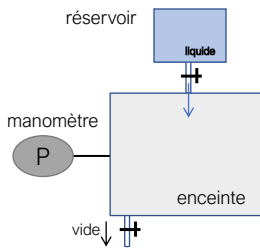


- ☐ L'enceinte est initialement vide
- ☐ La température reste constante (T) tout au long de la transformation
- ☐ On introduit le liquide goutte à goutte
- ☐ On enregistre la pression P en fonction de la masse m de liquide introduit

62

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #1

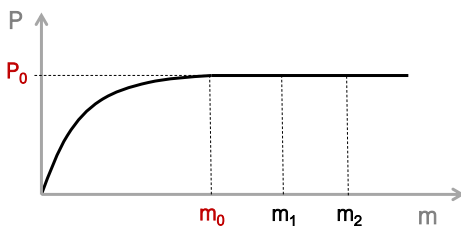


- ☐ On introduit une première goutte de liquide
 - Elle se vaporise
 - La pression augmente
- ☐ On introduit une deuxième goutte de liquide
 - Elle se vaporise
 - La pression augmente
- ☐ ...
- ☐ On introduit suffisamment de liquide
 - Le liquide se rassemble au fond de l'enceinte
 - la pression reste **CONSTANTE**.

63

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #1

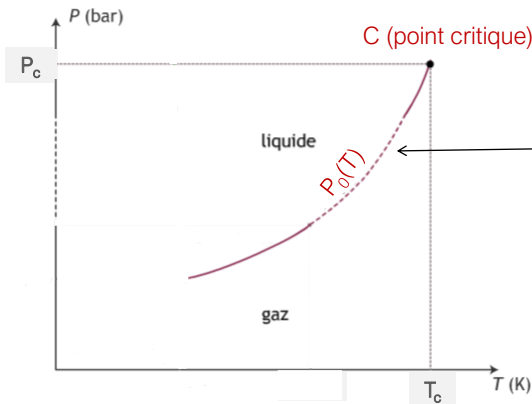


- ☐ P_0 est la pression de vapeur saturante
- ☐ P_0 ne dépend que de T
- ☐ Quand on passe de m_1 à m_2 ($m_1 > m_0$), P reste constante alors que V diminue
 - Une partie de la vapeur se liquéfie

64

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #1

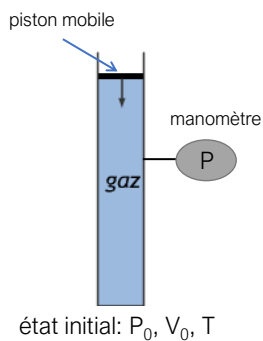


- ❑ Si on renouvelle l'expérience à différentes températures, on peut construire la **courbe d'équilibre liquide - vapeur** = évolution de la pression de vapeur saturante en fonction de la température
- ❑ C est le point critique
- ❑ Pour $T > T_c$, il n'y a jamais de liquide dans l'enceinte

65

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #2

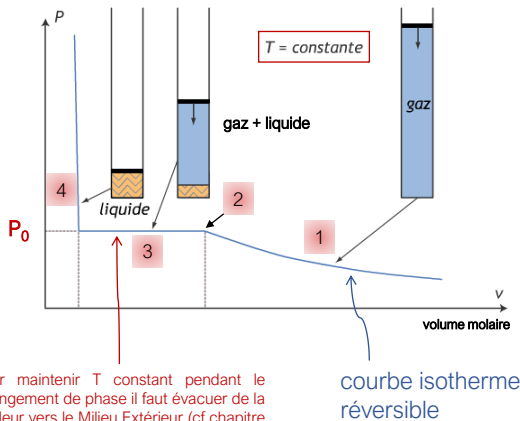


- ❑ On diminue progressivement le volume en descendant le piston
- ❑ La température reste constante (T) tout au long de la transformation
- ❑ On enregistre la pression P à l'aide du manomètre pour chaque position du piston
- ❑ Quelle allure a la courbe $P(v)$ (**diagramme de Clapeyron**) ? ($v = V/n$ = volume molaire)

66

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

❖ Expérience #2

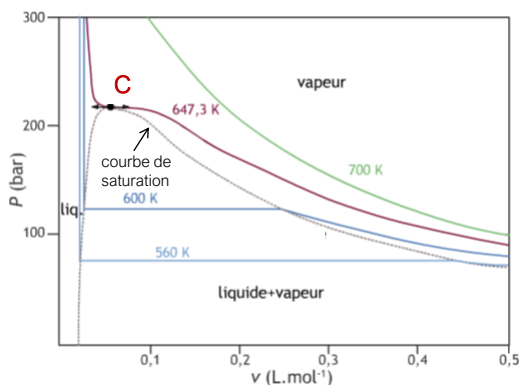


1. P augmente régulièrement pendant que v diminue.
2. L'équilibre liquide-vapeur (à la température T) est atteint
 - Pression de saturation = pression de vapeur saturante $P_0(T)$
 - La vapeur commence à se liquéfier
3. Le volume diminue MAIS la pression reste constante tant que deux phases coexistent.
4. Quand toute la vapeur a été transformée en liquide, une petite diminution de volume nécessite d'augmenter très fortement la pression.

67

Mise en évidence du changement de phase liquide - vapeur

Diagramme de Clapeyron de l'eau



- ❑ Si on répète l'expérience à différentes températures
⇒ Isothermes
- ❑ La courbe qui joint tous les points de démarrage et de fin de changement de phase est la courbe de saturation.
- ❑ Au point critique $C(v_c, P_c)$ (extrémité haute de la courbe de coexistence liquide-vapeur)
⇒ Liquide et vapeur sont identiques
- ❑ Pour $T > T_c$: état gazeux, quelque soit le volume

68

Evaporation et ébullition

VAPORISATION

- ❑ Changement de phase liquide-vapeur
- ❑ Absorbe de l'énergie thermique

❑ EVAPORATION

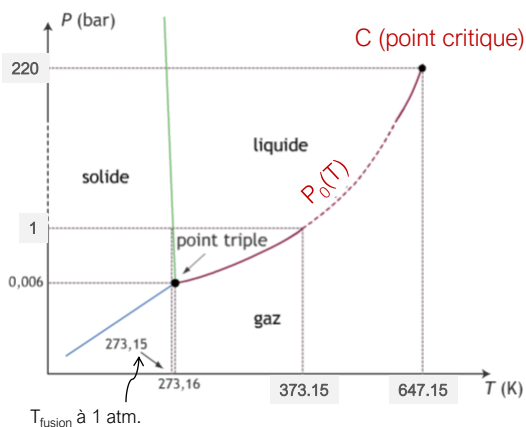
- Phénomène « lent »
- Phénomène surfacique
- A lieu à toute température
- Dépend de T , des échanges avec l'air ambiant (vent, courant d'air)

❑ EBULLITION

- Phénomène « rapide »
- Phénomène volumique
- Sous une pression donnée, a lieu à une température bien déterminée $T_{\text{ébui}}$.
- $T_{\text{ébui}}$ se lit sur le diagramme (P,T) quand la pression de vapeur saturante est égale à la pression de l'air atmosphérique.

69

Diagramme (P,T) de l'eau



❖ Point critique C:

- ❑ $P_c = 220$ atm.
- ❑ $T_c = 647,15$ K

❖ Point triple

- ❑ $P_t = 0,006$ atm.
- ❑ $T_t = 273,16$ K

❖ Ebullition

- ❑ $P = 1$ atm.
- ❑ $T_{\text{ébui}} = 373,15$ K = 100°C

Autres corps purs avec cette particularité : Sb (antimoine) et Bi (bismuth).

70

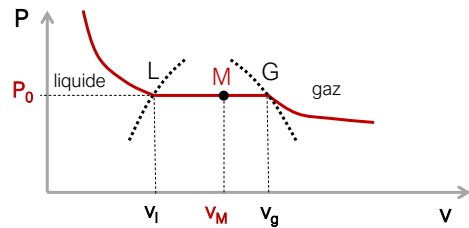
Règle des moments

❖ On considère un système diphasique (liquide/gaz) constitué d'une masse m d'un corps pur:

$$m = m_l + m_g \quad \text{ou} \quad n = n_g + n_l$$

❖ Dans un diagramme de Clapeyron, l'état est représenté par un point M .

- Fraction molaire de gaz: $X = n_g/n$
- Fraction molaire de liquide: $n_l/n = 1-X$
- Volume de liquide: $V_l = n_l \cdot v_l$
- Volume de gaz: $V_g = n_g \cdot v_g$



71

Règle des moments

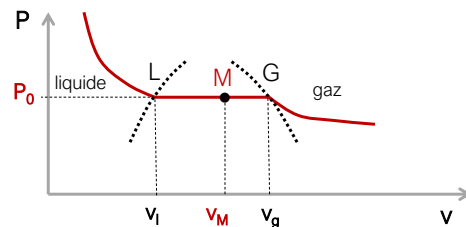
❖ Règle des moments:

On a $V = V_l + V_g$ donc $n \cdot v = n_l \cdot v_l + n_g \cdot v_g$

En divisant par n , on a: $v = \frac{n_l}{n} \cdot v_l + \frac{n_g}{n} \cdot v_g = (1 - X) \cdot v_l + X \cdot v_g$

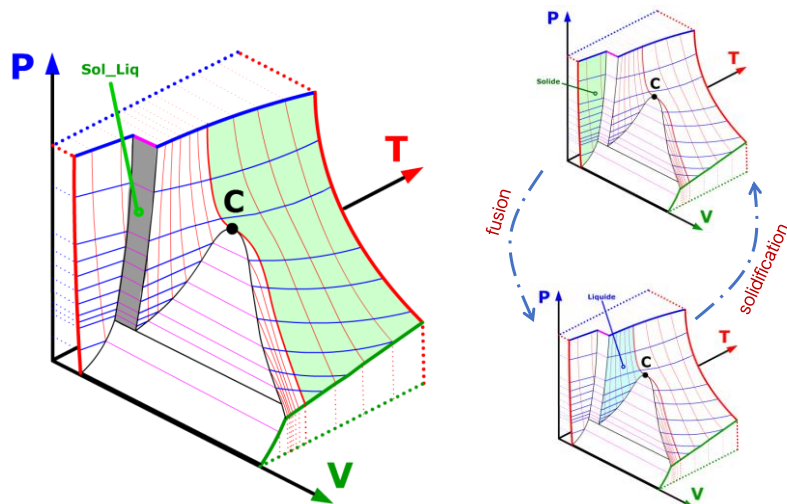
$$\text{d'où: } X = \frac{v - v_l}{v_g - v_l} = \frac{\overline{LM}}{\overline{LG}}$$

$$\text{Et: } \frac{n_l}{n_g} = \frac{v_g - v}{v - v_l} = \frac{\overline{MG}}{\overline{ML}} = \frac{\text{masse de liquide}}{\text{masse de gaz}}$$



72

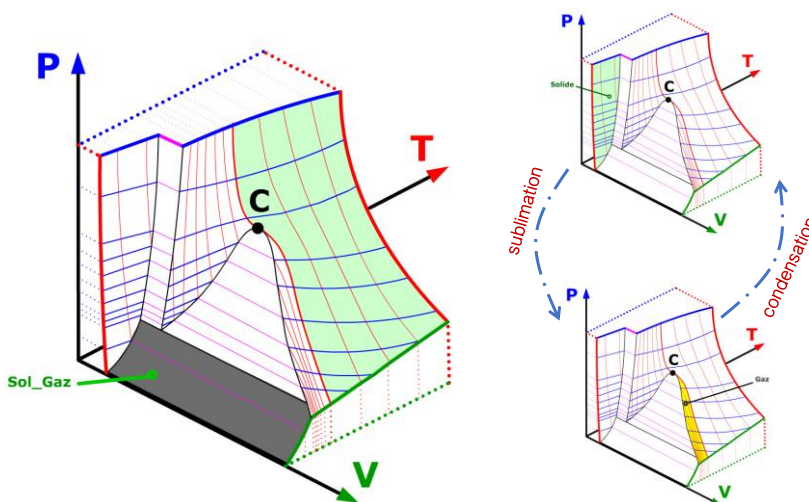
Equilibre solide - liquide



❖ Pas de point critique → la transformation peut avoir lieu jusqu'à pression « infinie ».

73

Equilibre solide - gaz



74

ASPECTS ÉNERGÉTIQUES DES CHANGEMENTS DE PHASE

- ❖ ENTHALPIE DE TRANSITION DE PHASE (CHALEUR LATENTE)
- ❖ RELATION DE CLAPEYRON
- ❖ ÉVOLUTION DE LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE AVEC LA TEMPÉRATURE

PARTIE N°9: ASPECTS ÉNERGÉTIQUES DES CHANGEMENTS DE PHASE

Enthalpie de transition de phase: chaleur latente

- ❖ L'enthalpie massique (ou molaire) de transition de phase ($1 \rightarrow 2$) est égale à la quantité de chaleur Q nécessaire pour faire passer réversiblement 1 kg (ou 1 mole) de corps pur de la phase 1 à la phase 2, en maintenant la température T constante et la pression P égale à la pression d'équilibre des deux phases ($P = \text{constante}$).
- ❖ L'enthalpie massique (ou molaire) de transition de phase est aussi appelée **chaleur latente massique (ou molaire) de changement d'état L** (J.kg^{-1} ou J.mole^{-1}).
- ❖ L varie avec la température T et donc avec la pression P .

Enthalpie de transition de phase: chaleur latente

Lors d'un changement d'état, l'énergie est reçue par le corps pur sous forme de chaleur:

$$\delta Q = dU - \delta W = dU + PdV$$

A pression constante:

$$\delta Q = d(U + PV) = dH$$

Soit:

$$Q = \Delta H_{A \rightarrow B} = L_{A \rightarrow B}$$

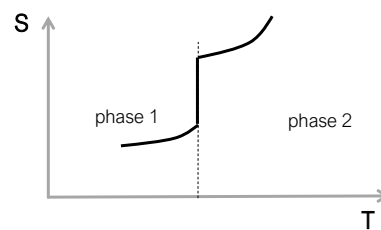
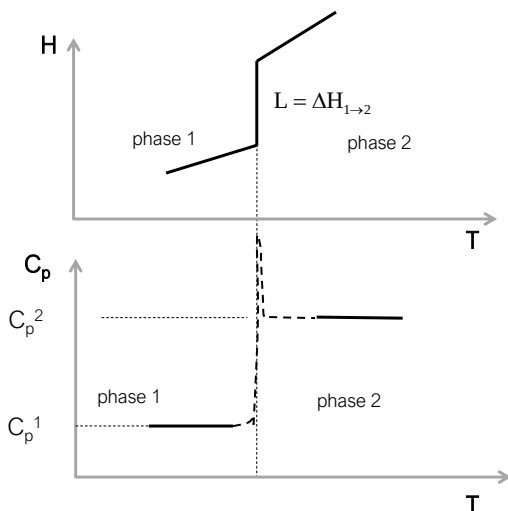
Pour une transformation réversible:

$$\delta Q = T \cdot dS \Rightarrow Q = T(S_2 - S_1) = T \cdot \Delta S_{1 \rightarrow 2} = L_{A \rightarrow B}$$

≥ 0 ≥ 0

77

Enthalpie de transition de phase: chaleur latente



On a, à pression constante,

$$\delta Q = m \cdot C_p \cdot dT = dH$$

$$\text{D'où : } m \cdot C_p = \frac{dH}{dT}$$

78

Relation de Clapeyron

Lors d'une transformation de phase du premier ordre $A \rightarrow B$, la relation de Clapeyron relie la discontinuité du volume ($v_B - v_A$), la pente de la courbe d'équilibre $P_{AB}(T)$ et la chaleur latente L :

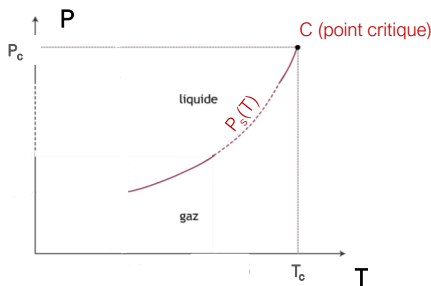
$$L(T) = T \cdot [v_B - v_A] \cdot \frac{dP_{AB}}{dT}$$

$\downarrow$
 ≥ 0

$\swarrow$
 même signe

79

Relation de Clapeyron

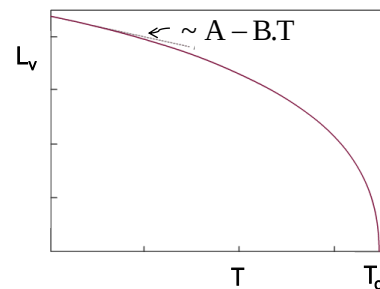
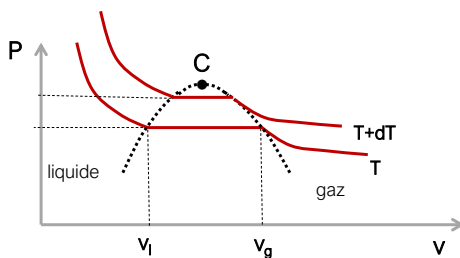


□ Transition liquide-vapeur:

$$L_V(T) = T \cdot [v_g - v_l] \cdot \frac{dP_s(T)}{dT}$$

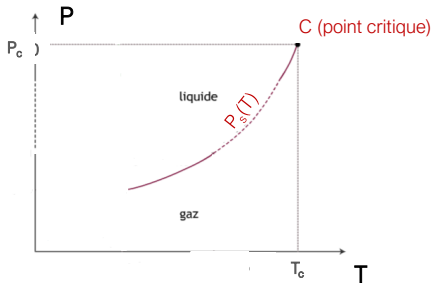
□ Près de T_C : $(v_B - v_A) \rightarrow 0$ et $\frac{dP_s(T)}{dT}$ fini donc:

$$L_V \rightarrow 0 \text{ quand } T \rightarrow T_C$$



80

Evolution de la pression de vapeur saturante avec la température



❖ Si $V_g \gg V_l$

$$\frac{dP_s(T)}{dT} = \frac{L_v(T)}{T \cdot [v_g - v_l]}$$

$$\frac{dP_s(T)}{dT} = \frac{L_v(T)}{T \cdot v_g}$$

❖ Pour un gaz parfait:

$$\frac{dP_s(T)}{P} = \frac{L_v(T)}{R} \cdot \frac{dT}{T^2}$$

❖ Si on suppose que $L_v(T)$ est constante:

$$P = P_0 \cdot \exp\left(-\frac{L_v}{RT}\right)$$

81

EVOLUTION DES SYSTÈMES: POTENTIELS THERMODYNAMIQUES

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

- ❖ Le deuxième principe définit le critère universel d'évolution des systèmes:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \text{ (valable quelque soit le système)}$$

- ❖ S est un potentiel thermodynamique, par analogie avec l'énergie potentielle pour un système mécanique.
- ❖ La stabilité d'un système mécanique → minimum d'énergie potentielle
- ❖ La stabilité d'un système thermodynamique ISOLÉ → **Maximum d'entropie !**

83

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

- ❖ Potentiels thermodynamiques pour des systèmes fermés:

Energie interne	U	
Enthalpie	$H = U + PV$	
Energie libre	$F = U - TS$	
Enthalpie libre	$G = H - TS = U + PV - TS$	(G est aussi appelée énergie libre de Gibbs)

- ❖ Fonctions reliées les unes avec les autres
- ❖ Système fermé → n est constant → U, H, F et G = fonctions de 2 variables

84

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

❖ Potentiels thermodynamiques pour des systèmes fermés:

Energie interne	$dU = T.dS - P.dV$
Enthalpie	$dH = V.dP + T.dS$
Energie libre	$dF = -P.dV - S.dT$
Enthalpie libre	$dG = V.dP - S.dT$

85

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

❖ On utilise U, H, F ou G selon le type transformation que l'on étudie.

⇒ La condition d'équilibre s'écrit différemment selon la situation.

❖ Pour une transformation à S et V constant:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \text{ avec } dU = \delta W + \delta Q$$

Donc:

$$dU \leq 0$$

⇒ L'équilibre correspond au minimum d'énergie interne

86

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

□ Transformation à S et P constants:

$$dS - \frac{\delta Q}{T} \geq 0 \Leftrightarrow dS - \frac{dU - \delta W}{T} \geq 0 \text{ et } dU = dH - V \cdot dP - P \cdot dV$$

□ Comme:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T} \text{ avec } dS = 0 \text{ et } dP = 0$$

□ Alors l'équilibre correspond à un **minimum d'enthalpie**:

$$dH \leq 0$$

87

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

□ Transformation à T et V constants:

$$F = U - T \cdot S \text{ et } dU = dF + T \cdot dS + S \cdot dT$$

$$dS - \frac{\delta Q}{T} \geq 0 \Leftrightarrow dS - \frac{dF + T \cdot dS + S \cdot dT + P \cdot dV}{T} \geq 0 \text{ et } dT = dV = 0$$

□ Alors l'équilibre correspond à un **minimum d'énergie libre**:

$$dF \leq 0$$

88

Evolution des systèmes: potentiels thermodynamiques

□ Transformation à T et P constants (thermodynamique chimique):

$$G = U + P \cdot V \text{ et } dU = dG + T \cdot dS + S \cdot dT - P \cdot dV - V \cdot dP$$

$$dS - \frac{dG + T \cdot dS + S \cdot dT - P \cdot dV - V \cdot dP + P \cdot dV}{T} \geq 0 \text{ et } dT = dP = 0$$

□ Alors l'équilibre correspond à un **minimum d'enthalpie libre**:

$$dG \leq 0$$